



**Kemian tekniikan korkeakoulu
Puunjalostustekniikan koulutusohjelma**

Iida Vertanen

**Vaihtoehtoisten aallotusprofiilien hyödyntäminen
laadunkehityksessä**

**Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 20.1.2015.**

Valvoja

Professori Jouni Paltakari

Ohjaaja

Diplomi-insinööri Tuomo Sippus

Tekijä Iida Vertanen		
Työn nimi Vaihtoehtoisten aallotusprofiilien hyödyntäminen laadunkehityksessä		
Laitos Puunjalostustekniikan laitos		
Professuuri Paperi- ja painatustekniikka	Professuurikoodi PUU-21	
Työn valvoja Professori Jouni Paltakari		
Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) Diplomi-insinööri Tuomo Sippus		
Päivämäärä 20.1.2015	Sivumäärä 96	Kieli Suomi

Tiivistelmä

Työssä selvitettiin voidaanko jollain toisella aaltoprofiililla kuin standardinmukaisella lähellä A-aaltoa olevalla aallolla, mitata aallotuskartongin puristuslujuusmittaukset ja saada paremmin esiin tuotteen todelliset ominaisuudet. Kirjallisuus osassa tarkasteltiin aaltopahvi laatikon, aaltopahvin sekä aallotuskartonkien ja lainerien erilaisia mittauksia. Siinä perehdyttiin myös aallon muodostumiseen sekä aaltoprofiiliin ja aaltoprofiilin tuomaan vaikutukseen aaltopahvin lujuudessa.

Työn kokeellisessa osassa tutkittiin eri aaltoprofiilien vaikutusta erilaisilla neliömassoilla. Tavoitteena oli selvittää saadaanko eri aaltoprofiileilla erilaisia CMT- ja CCT-arvoja. Tarkemmin perehdyttiin mataliin neliömassoihin. Matalilla neliömassoilla tutkittiin ennustaako pieni B-aalto paremmin aallotuskartongilla aaltopahvin puristuslujuusarvoja kuin A-aalto.

Kokeellisessa osassa ilmeni, että aallotuskartongin CMT litistyslujuusarvoihin vaikuttaa erittäin paljon aaltoprofiili. Pienillä aalloilla saavutettiin selvästi korkeammat arvot. Mitä matalampi neliömassa oli, sitä voimakkaammin aaltoprofiilien ero näkyi. CCT poikisuuntaisessa puristuslujuudessa pienet aaltoprofiilit olivat tehokkaampia vain matalilla neliömassoilla. Aaltopahvitehtaassa ajatus koeajossa nähtiin, että ECT- ja FCT-arvot voidaan ennustaa CCT- ja CMT-arvoista.

Työssä selvisi, että standardinmukainen lähellä A-aaltoa oleva aalto ei ennusta luotettavasti aaltopahvin lujuutta aallotuskartongin mittausten perusteella.

Avainsanat aallotuskartonki, aaltopahvi, CMT, CCT, FCT, ECT, BCT, aaltoprofiili, aallotus, matala neliömassa, A-aalto, B-aalto

Author Iida Vertanen		
Title of thesis Alternative fluting profiles in the development of quality		
Department Forest Products Technology		
Professorship Paper and Printing Technology		Code of professorship Puu-21
Thesis supervisor Professor Jouni Paltakari		
Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) M.Sc. (Tech) Tuomo Sippus		
Date 20.1.2015	Number of pages 96	Language Finnish

Abstract

The aim of the study was to examine would some other fluting profile than standard A-flute predict better compression strengths of fluting and bring out the real characteristics of product. The aim of the literature review was to discover different measurements of corrugated board box, corrugated board, fluting and liner. In the literature examined also the formation of the wave, fluting profile and how different profiles affect to strength of corrugated board.

In the experimental part examined how different fluting profiles affect with different basis weights. The aim was discover would different fluting profiles product different CMT and CCT values. Interesting part were low basis weights.

In the experimental part revealed that CMT values of fluting affect very much used fluting profile. Smaller waves product higher strength values. The lower basis weight the more difference with fluting profiles. With CCT values small fluting profiles were stronger only with low basis weights. The mill scale trials in corrugated board mill showed that ECT and FCT values can predict from CMT and CCT values.

The result of this study was that standard A-flute doesn't predict reliably strength of corrugated board based on measurement of fluting.

Keywords corrugated medium, corrugated board, CMT, CCT, FCT, ECT, BCT, fluting profile, corrugation, low basis weight, A flute, B flute

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Stora Enso Oyj:n toimeksiannosta Heinolan Flutingtehtaalle.

Työn valvojana toimi professori Jouni Paltakari ja ohjaajana Diplomi-insinööri Tuomo Sippus. Tahdon kiittää heitä väsymättömästä ohjauksesta ja kiinnostuksesta diplomityöni aikana. Erityisesti tahdon kiittää Tuomoa kannustuksesta ja opastuksesta. Hänen ansioistaan sain Heinolan Flutingtehtaalla korvaamatonta tietoa ja kokemusta.

Tahdon kiittää koko Heinolan Flutingtehtaan ja Eforan Oyj:n henkilökuntaa suuresta avusta ja opastuksesta. Erityisesti kartonkitehtaan työntekijöitä. He jaksoivat oman työnsä ohessa väsymättä neuvoa minua diplomityöni aikana. Heidän ammattitaitonsa oli korvaamatonta työni onnistumiselle. Stora Enson Lahden ja Heinolan Packaging tehtaille omat kiitoksensa, kun he mahdollistivat koeajoni ja niiden mittaukset aaltopahvilla.

Rasmus Kiihamäkeä tahdon kiittää vertaistuesta ja aivoriihistä diplomityön aikana. Perheelleni ja ystävilleni suuri kiitos väsymättömästä kannustamisesta ja uskosta opiskelujeni ja diplomityöni aikana. Uskoitte vahvemmin osaamiseeni ja pärjäämiseeni kuin minä itse koskaan olisin voinut uskoa.

Heinolassa 20.1.2015

Iida Vertanen

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto.....	6
1.1	Yrityksen esittely	6
1.2	Taustaa	6
1.3	Tavoitteet.....	7
2	Tuoteanalyysi.....	8
2.1	Aaltopahvi	8
2.2	Aallotuskartonki	11
3	Lujuusmittaukset.....	13
3.1	Materiaalien, aallotuskartongin ja lainerien testaus.....	13
3.1.1	Kosteus.....	13
3.1.2	Kulutuksenkestävyys	14
3.1.3	Pintaominaisuudet	14
3.1.4	Puristuslujuus	16
3.2	Aaltopahvin testaus.....	24
3.2.1	ECT reunanlitistyslujuus.....	24
3.2.2	FCT litistyslujuus	27
3.2.3	Taivutusjäykkyys.....	29
3.2.4	PAT liimasauman lujuustesti	31
3.2.5	Uudet mittaustavat.....	32
3.3	Aaltopahvilaatikon testaus	33
3.4	Mittausten kohtaaminen.....	37
4	Aallotus.....	38
4.1	Aallotusprosessi.....	38
5	Aaltoprofiili	42
5.1	Mistä profiili koostuu.....	42
5.2	Eri aaltoprofiileja ja niiden ominaisuuksia	43
5.3	Kevyemmät kartongit ja pienemmät aallot	45
5.4	Aaltoprofiilin vaikutus aaltopahvin lujuuteen.....	46
6	kirjallisen osan yhteenveto	55

Kokeellinen osa	56
7 Eri aaltoprofiilien vaikutus aallotuskartongin CMT:n ja CCT:n puristuslujuusarvoihin	56
7.1 Tavoitteet.....	56
7.1.1 Tutkimuskysymykset	57
7.2 Käytetyt materiaalit ja menetelmät	58
7.2.1 Mitattavat näytteet	58
7.2.2 Mittaukset.....	59
7.3 Tulosten esitystapa ja luotettavuuden arviointi	59
7.4 Tulokset.....	60
7.4.1 CCT.....	60
7.4.2 CMT.....	62
7.4.3 Hajonnat	64
7.4.4 Kuituorientaation vaikutus poikkiradalla	66
7.4.5 CMT-käyrän välipiste	69
7.4.6 Näytteenoton ja käsittelyn vaikutus laboratorion arvoihin	71
7.5 Yhteenveto	75
8 Koeajo matalalla neliömassalla	77
8.1 Tavoitteet.....	77
8.2 Tutkimuskysymykset	77
8.3 Käytetyt materiaalit ja menetelmät	78
8.3.1 Koeajon suoritus aallotuskartonkitehtaalla	78
8.3.2 Koeajon suoritus aaltopahvitehtaalla	79
8.3.3 Mittaukset.....	79
8.4 Tulosten esitystapa ja luotettavuuden arviointi	80
8.5 Tulokset ja niiden tarkastelu	81
8.5.1 Aallotuskartonkitehtaan mittaukset	81
8.5.2 Aaltopahvitehtaan mittaukset	83
8.6 Yhteenveto matalan neliömassan koeajosta.....	87
9 Johtopäätökset ja suositukset	89

10	LÄHTEET	91
11	LIITTEET.....	97

LYHENTEET JA SANASELITYKSET

Anisotropia	Aineominaisuuksien erilaisuus eri tarkastelusuunnissa
BCT	Box Compression Test, Laatikon lujuustesti
BQM	Board Quality Measurement
CCT	Corrugated Crush Test, Poikkisuuntainen puristuslujuus testi
CMT	Concora Medium Test, Aallotuskartongin litistyslujuustesti
CLT	Concora Liner Test
ECT	Edgewise Crush Test, Reunanlitistyslujuus testi
Elastisuus	Materiaali palaa alkuperäiseen muotoonsa, kun rasitus poistetaan
FCT	Aaltopahvin litistyslujuustesti
Formaatioprofiili	Kuitujen pienimittakaavainen vaihtelu kartonkiradalla
Gelaminoitumislämpötila	Lämpötila, jossa ligniini ja hemiselluloosat sulavat
Hemiselluloosa	Puukuidun komponentti
KS	Kartonkikoneen konesuunta, MD
Neitseellinen massa	Kierrättämätön puusta saatu kuitu
Neutraali sulfiittiliuos	NSSC (Neutral Sulphite SemiChemical)
PAT	Pin Adhesion Test, Liimasaumanlujuustesti
Orientaatio	Kuitujen suuntautuminen
Plastisoituminen	Pysyvien muodonmuutosten syntyminen materiaaliin
PS	Kartonkikoneen poikkisuunta, CD
RH	Suhteellinen kosteus
RCT	Ring Crush Test
SCT	Hort Span Compression Test

1 JOHDANTO

1.1 Yrityksen esittely

Tämä työ on tehty Stora Enso Oyj:n Flutingtehtaalle. Tehdas valmistaa puolike-miallista aallotuskartonkia. Raaka-aineena aallotuskartongissa käytetään koivuha-ketta. Massan lisänä voidaan käyttää myös pieniä määriä aaltopahvitehtaalta saa-tavaa kierrätyskuitua. Tehtaan tuotantokapasiteetti on noin 300 000 tn. Osa työn koeajoista ja mittauksista on suoritettu Heinolan ja Lahden aaltopahvia valmista-villa Packaging tehtailla.

1.2 Taustaa

Aaltopahvin kilpailuvaltteja muihin pakkausmateriaaleihin verrattuna ovat vahva ja kevyt rakenne sekä korkea taivutusjäykkyys. Nykyään aaltopahvin valmistuk-sessa ollaan siirrytty käyttämään ohuempia ja kevyempiä kartonkilaatuja. Tek-niikka ja kartonkien valmistustavat ovat kehittyneet. Nykyään valmistetaan kestä-vämpiä ja lujuudeltaan parempia aaltopahveja ja aaltopahvilaatikoita. Osana kehi-tykseen ovat vaikuttaneet muuttuneet aaltoprofiilit. Yleisimpiä aaltopahvilaati-koissa käytettyjä aaltoprofiileja ovat B- ja C-profiilit. Vaikka aaltopahvin valmis-tustavat ja aaltoprofiilit ovat uudistuneet, niiden lujuusmittauksiin käytetään yhä standardin mukaista lähellä A-aallon aaltoprofiilia olevaa aaltoa. A-aalto on pro-fiililtaan yksi suurimmista aalloista, eikä vastaa aaltopahvinvalmistajien nykyään käyttämiä profiileja.

1.3 Tavoitteet

Tämän työn tarkoitus on selvittää, voidaanko jollain toisella aaltoprofiililla kuin standardinmukaisella melkein A-aallolla, mitata aallotuskartongin puristuslujuusmittaukset ja saada paremmin esiin tuotteen todelliset ominaisuudet. Työ koostuu kirjallisuusosasta ja kokeellisesta osasta.

Kirjallisuusosassa selvitetään kirjallisuudesta löytyvät viitteet aaltopahvin raaka-aineiden aallotuskartongin ja lainerin, aaltopahvin ja aaltopahvilaatikon lujuusmittauksiin sekä selvitetään, miten erilaiset aaltoprofiilit vaikuttavat aaltopahvin lujuuteen.

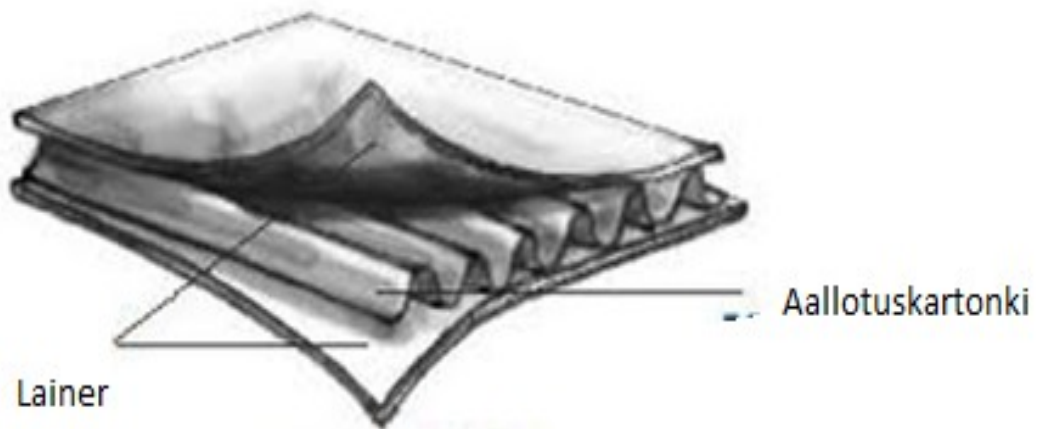
Työn kokeellinen osa on kaksiosainen. Ensin tutkitaan eri aaltoprofiilien A-, B- ja C-aallon vaikutusta aallotuskartongin puristuslujuusmittauksiin CMT:n ja CCT:n. Toisessa osassa tutkitaan eri aaltojen vaikutusta lopputuotteessa aaltopahvilla. Tarkoitus on nähdä, miten eri aaltoprofiileilla saadaan ennustettua aaltopahvin lujuutta. Aaltopahville tehdään vastaavat testit FCT ja ECT. Halutaan tutkia tuovatko eri aaltoprofiilit samanlaisia eroja aallotuskartongin puristuslujuuksissa kuin aaltopahvin puristuslujuuksissa.

2 TUOTEANALYYSI

2.1 Aaltopahvi

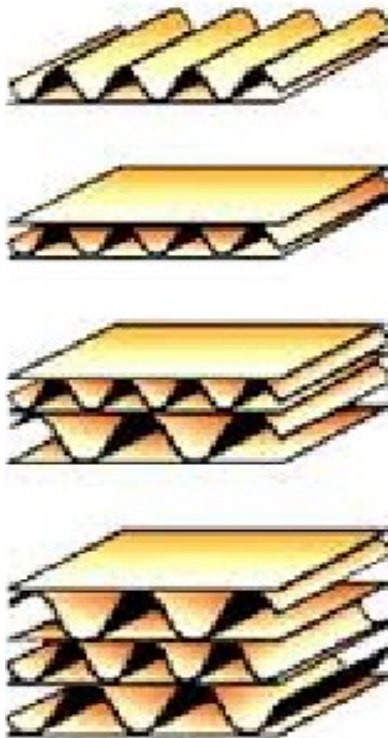
Aaltopahvi on maailman käytetyin pakkausmateriaali. Nykyisin ei ole tuotetta, mitä ei voisi pakata aaltopahvipakkaukseen. Aaltopahvia käytetään kuljetuspakkauksina, myymälävalmiina yksikköpakkauksina, esittelypakkauksina, lahjapakkauksina sekä myymälätelineinä. Painamattomasta aaltopahvista valmistetaan myös aaltopahvilaatikon sisään tulevia, tuotteen paikallaan pitäviä sisäosia ja suojaevyjä. Aaltopahvia käytetään runsaasti, sillä aaltopahvilla on loistavat suojausominaisuudet. Suojausominaisuudet johtuvat aaltopahvin kevyestä, mutta vahvasta rakenteesta. [1, 2]

Aaltopahvi on kerrosmainen tuote, jossa kahden tasomaisen lainerin välissä on kolmas aallotettu kerros, aallotuskartonki. [3] Kuvassa 1. on kuvattu aaltopahvin rakenne.



Kuva 1. Aaltopahvin rakenne [4]

Kerrokset on liimattu toisiinsa aaltojen harjojen kohdalta. Kevyt ja kestävä kerrosrakenne on jäykkä ja paksuuteensa nähden huomattavan kevyt. [1] Lainerien tehtävä on olla aaltopahvin koossapitävä voima. Aallotuskartonki pitää lainerit erillään toisistaan ja siten luo todella kevyen, mutta äärimmäisen jäykän ja lujan rakenteen. Yksittäin kerrokset voivat olla heikkoja, mutta yhdessä ne muodostavat erittäin lujan rakenteen. [5] Yksiaaltoinen aaltopahvi on yleisin aaltopahvityyppi. Yhdistelemällä useampi aallotuskartonki ja laineri saadaan monikerrosaaltopahveja. [2] Kuvassa 2 on esitelty yksipuolinen aaltopahvi, kaksipuolinen yksiaaltoinen aaltopahvi, kaksipuolinen kaksiaaltoinen aaltopahvi ja kaksipuolinen kolmiaaltoinen aaltopahvi.



Kuva 2. Eri aaltopahvityyppejä [2]

Aaltopahvilla on erittäin paljon pakkausmateriaaliksi sopivia ominaisuuksia. Taulukossa 1 on listattu aaltopahvin ja aaltopahvilaatikon ominaisuuksia.

Taulukko 1. Aaltopahvin ja aaltopahvilaatikon ominaisuuksia

Ominaisuus	Selitys
Keveys	Pakkaus ei lisää tuotteen painoa
Lujuus ja pinoamiskestävyys	Varastoinnissa ja kuljetuksissa
Joustavuus ja suojaavuus	Soveltuu herkille tuotteille
Iskunkestävyys	Hyvä
Muodonpitävyys	Normaalikosteusalueella < 60 RH
Hygieenisuus	Kertakäyttöisenä korkealuokkainen
Eristyskyky	Lämpöä ja kylmyyttä vastaan
Tilantarve	Pieni, pakkaukset toimitetaan kasaamattomina
Työstettävyys	Helppoa, nopeaa
Käsiteltävyys	Voidaan avata ja sulkea useita kertoja
Soveltuvuus	Automaattisille täyttö- ja pakkauskoneille
Kierrätyskelppoisuus	On palautettavissa kuitukiertoon jopa 4-5 kertaa

[1]

2.2 Aallotuskartonki

Aallotuskartongin tehtävä aaltopahvissa on pitää linerit erillään toisistaan. Näin muodostuu painoonsa nähden luja ja jäykkä rakenne. [1, 3] Jotta aallotuskartongin olisi mahdollista täyttää tehtävänsä, on sillä oltava paljon erilaisia ominaisuuksia. Aallotuskartongin ominaisuudet voidaan jakaa kahteen kategoriaan: ajettavuusominaisuuksiin ja lopputuoteominaisuuksiin. [3, 5, 6] Ajettavuusominaisuuksilla tarkoitetaan ominaisuuksia, joilla saadaan aikaan tasainen ja katkeamaton tuotanto aaltopahvikoneella. Lopputuoteominaisuuksilla tarkoitetaan aallotuskartongin ja aaltopahvin ominaisuuksia lopputuotteessa. Lopputuoteominaisuudet eroavat usein ajettavuusominaisuuksista, minkä vuoksi aaltopahvin valmistajan on ymmärrettävä sekä raaka-aineen että lopputuotteen tehtävät. [5, 6]

Lopputuotteen eli aaltopahvin ja aaltopahvilaatikon tärkein ominaisuus on sen suojauskyky. [1] Aaltopahvilla tärkein lujuutta kuvaava suure on puristuslujuus. Sitä mitataan BCT:llä (Box Compression Test). [29, 31] Aaltopahvin ominaisuuksista reunanlittistyslujuus ECT (Edgewise Compression Test) ja sivupaneelien taiputusjäykkyys vaikuttavat eniten laatikon suojauskykyyn [7]. Aallotuskartongin vastaavasti tärkein ominaisuus on poikkisuuntainen puristuslujuus CCT (Corrugated Crush Test). Myös litistyslujuudella CMT:llä (Concora Medium Test) on vaikutusta aaltopahvin paksuuden ylläpitäjänä. [1, 3] Toinen tärkeä ominaisuus aaltopahvilla ja sen materiaalilla aallotuskartongilla on kulutuksenkestävyys. Mekaaninen lujuus, sitkeys ja hankauskestävyys ovat tärkeitä, jotta laatikko ja sen sisältö säilyvät hyvässä kunnossa. Käsittelynkestävyyttä kuvataan Mullen puhkaisulujuudella. [6] Toinen tärkeä huomioitava asia kulutuksenkestävyydessä ovat aaltopahvin kosteuden kestävyys ja viruminen. Aaltopahvin ja sen materiaalien puristus- ja jäykkyysominaisuudet riippuvat paljon kartongin kosteuspitoisuudesta [8]. Virumiskestävyys tarkoittaa aaltopahvilaatikon ja aallotuskartongin ominaisuutta kestää pitkäaikaista kuormaa ja kuorman aiheuttaman jännityksen sekä kosteuspiitoisuuden muutoksia [9]. Hyvät ajettavuusominaisuudet aaltopahvin valmistuksessa tarkoittavat sitä, että aaltopahvia saadaan tuotettua tehokkaasti ilman katkoja aaltopahvikoneella tai turhia materiaalien menetyksiä. Aallotuskartongin täytyy kestää murtumatta aallotusvaiheen rasitukset. Sen täytyy muotoutua aalloille aallotustelojen välissä. Aaltojen tulee olla tasakorkuisia ja ylläpitää muotonsa. Ajettavuutta kuvaa myös linerien ja aallotuskartongin liimattavuus. [1]

Aallotuskartonkia valmistetaan sekä neitseellisestä massasta että massasta, joka on kierrätyskuidun ja neitseellisenkuidun sekoitusta. Neitseellistä kuitumassaa kutsutaan myös puolikemialliseksi massaksi. Tästä valmistetaan puolikemiallista aallotuskartonkia SC-flutinkia. Puolikemiallista massaa valmistetaan yleisimmin lehtipuuhakkeesta. Koivuhake on paras mahdollinen aallotuskartongin valmistukseen. [1, 10] Koivun kuidut sisältävät enemmän hemiselluloosaa kuin muut lehtipuukuidut. Tämä tuo aallotuskartonkiin tuotteen vaatimaa jäykkyyttä. Puolikemiallista massaa valmistetaan keittämällä lehtipuuhaketta neutraalissa sulfiittiliuoksessa (NSSC Neutral Sulphite SemiChemical). Neutraalisulfiittimenetelmän tarkoituksena on ainoastaan pehmentää hakkeen kuiturakennetta hiukan, jotta se voidaan kuiduttaa mekaanisesti. Tällöin lopputuotteelle tärkeä hemiselluloosaa ei häviä prosessista. Kiertokuitupohjaista aallotuskartonkia hyödynnetään ratkaisuis-
sa, jotka eivät vaadi yhtä hyviä lujuus- ja jäykkyyssominaisuuksia, kosteudenkestävyyttä tai elintarvikekelpoisuutta kuin mitä neitsytkuituisilta tuotteilta vaaditaan.
[1]

3 LUJUUSMITTAUKSET

Aaltopahvin lujuusmittaukset jaetaan kolmeen osaan: aaltopahvilaatikon, aaltopahvin sekä käytettyjen materiaalien, aallotuskartongin ja lainerien lujuuksien mittaukseen. Mittaukset ovat kytköksissä toisiinsa. Aaltopahvilaatikon lujuus ja käytettävyys muodostuu laatikon rakenteesta, aaltopahvin lujuudesta sekä ominaisuuksista. Aaltopahvin ominaisuudet taas johtuvat suoraan sen materiaalien ominaisuuksista. Kaikilla kolmella alueella on testauksessa pitkät perinteet ja vakiintuneet toimintatavat. Monet testit ovat lähtöisin tutkimuslaitoksista, mutta osa myös alan teollisuuden piiristä. [1, 11]

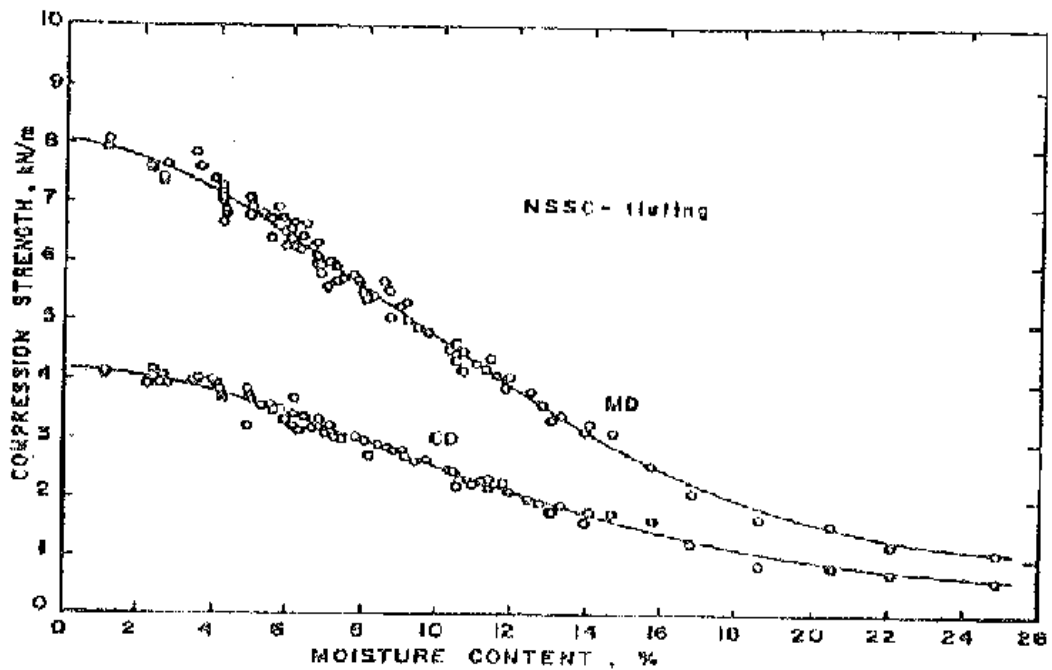
3.1 Materiaalien, aallotuskartongin ja lainerien testaus

Raaka-aineiden aallotuskartongin ja lainerien testaaminen kohdistuu lähinnä kartonkien paperitekniisiin ominaisuuksiin. Niitä testataan osana laadunvalvontaa, mutta osaltaan halutaan tietoa, jotta kartonkeja voidaan parantaa ja prosessia hoitaa tehokkaammin. Sekä aallotuskartongille että lainerille tehdään kartongin perusmittauksia kuten vetolujuus, kosteus, paksuus ja neliömassa. Aaltopahvin valmistajat käyttävät samoja testejä osana vastaanottotarkastuksia. [1]

3.1.1 Kosteus

Kosteudella ja sen tasaisella jakautumisella radan poikkisuunnassa on suuri merkitys aaltopahvin valmistusprosessissa. Noin 8-10 % kosteus on paras mahdollinen, jotta aallotuskartongin plastisoituminen onnistuu ja aallotuskartonki aallottuu hyvin. [3] Ongelma on, että lyhyenkin kuljetuksen tai varastoinnin aikana kartonkirullan pintakerrokset ilmastoituvat ympäristön mukaan. Tällöin rullasta otetut kosteusnäytteet eivät kerro todellista kosteutta. Lämpötila erot voivat saada kosteuden tiivistymään etenkin rullan päätyihin. Kosteus ja kosteusprofiili voidaan määrittää uunikuivatuksella. [1]

Kosteuspitoisuus vaikuttaa myös kartongin jäykkyysominaisuuksiin. Kosteuden kasvaessa hemiselluloosat pehmenevät, kartongin kimmomoduuli heikkenee ja sisäiset kuitusidokset menettävät mekaanista lujuutta. [8, 12] Kuvasta 3. nähdään kuinka aallotuskartongin puristuslujuus heikkenee, kun kartongin kosteuspitoisuus kasvaa.



Kuva 3. Aallotuskartongin kone- ja poikkisuuntainen puristuslujuus kosteuden kasvaessa. [13]

3.1.2 Kulutuksenkestävyys

Puhkaisulujuus (Mullen) antaa kartongin lujuudesta hyvän yleiskuvan. Sen avulla voidaan melko tarkasti ennustaa aaltopahvin puhkaisulujuus laskemalla pintakarttonkien puhkaisulujuudet yhteen. [1] Testiä käytetään lähinnä lainerien mittaamisessa. Aallotuskartongin puhkaisulujuudella ei ole mainittavaa merkitystä aaltopahvin puhkaisulujuuden kannalta. Aallotuskartongin puhkaisulujuus on niin pieni lainerien puhkaisulujuuteen nähden, että sen voidaan katsoa olevan merkityksetön. [14]

3.1.3 Pintaominaisuudet

Ilmanläpäisevyydenvastustusta testataan, jotta saadaan laskettua huokoisuus. Huokoisuus selittää kartongin liimaantuvuutta. Mittaus tunnetaan myös Gurley-metodina. Testissä puhalletaan ilmaa kartongin läpi ja mitataan kuinka paljon kartonki vastustaa ilman läpi kulkemista. [1]

Vesiabsorptio mittaa veden imeytymistä pintakartonkiin tai valmiin aaltopahvin pintakartonkeihin. [1, 15] Aallotuskartongin vesiabsorptiokyky vaikuttaa liimaustulokseen. Liian korkea absorptiokyky voi johtaa huonoon liimaukseen. Tällöin vesi imeytyy aallotuskartongin sisään ennen kuin liiman gelaminoitumislämpötila on saavutettu ja liiman tärkkelys jää kuivaksi. Myös liian alhainen absorptiokyky aiheuttaa huonon liimaantumisen jos imeytyminen aallotuskartonkiin on liian vähäistä. [15] Absorptiokykyä testataan Cobb-menetelmällä. Testi kuvaa kartongin pinnan käyttäytymistä, kun se joutuu hetkeksi kosketuksiin vapaan veden kanssa. Eli testissä seurataan, paljonko vettä imeytyy kartonkiin. [1]

Kartonkien liimattavista pinnoista mitataan myös vesitippa-arvoja, eli kartongin pintaan asetetun vesitipan imeytymisaikaa kartonkiin. Vesitippa-testiä käytetään, kun kartonki on hydrofiilista. Jos kartonki on hydrofobista, käytetään Cobbin-menetelmää. Vesitippa-testillä kuvataan sitä kuinka kauan liiman sisältämän veden kestää imeytyä kartonkiin. [1]

Aaltopahvista mitataan pintakartonkien kitka. Kitkalla on merkitystä valmiiden aaltopahvipakkausten käyttäytymisen kannalta. Jos kartongilla on liian pieni kitkakerroin, siitä tehdyt pakkaukset voivat liukua kuljetuksen aikana eivätkä pysy päällekkäin. Vaikeuksia voi syntyä jo aaltopahvitehtaalla, kun arkkiniippuja siirretään paikasta toiseen. Pintakartongin kitkaa testattaessa, kitka mitataan niin, että kartongin ulkopinnat ovat vastakkain. Kitkamittaustesti voidaan tehdä myös valmiilla aaltopahvilla. [1]

3.1.4 Puristuslujuus

Kartonki valmistetaan orientoutuneista kuiduista. Eli sen jäykkyys- ja lujuusominaisuudet ovat anisotrooppisia. Kuitujen suuntautuminen on suunnilleen symmetristä. Tämä tarkoittaa, että jäykkyysominaisuudet ovat kartongin suunnasta riippuvaisia. Elastisille ominaisuuksille voidaan määrittää kolme symmetristä tasoa. Näin ollen kartongin rasituksille ja venymille on oletettu:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{yx}}{E_y} & \frac{-\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{xz}}{E_x} & \frac{-\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Symmetriasta johtuen:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \quad \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}, \quad \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad (2)$$

missä ν = Poissonin luku

E = Kimmokerroin, N/m^2

G = Liukukerroin, N/m^2

Alaindeksit tarkoittavat materiaalisuuntaa seuraavasti:

x = konesuunta

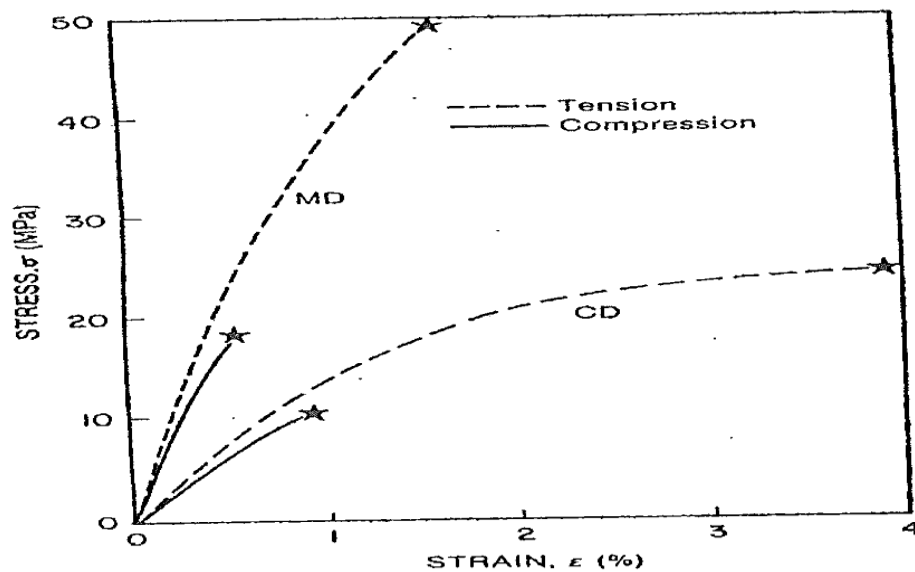
y = poikkisuunta

z = paksuussuunta

Nyt vain yhdeksän tuntematonta tekijää on jäljellä, E_x , E_y , E_z , ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yx} , G_{xy} , G_{xz} ja G_{yz} . Tasossa esiintyvät E_x ja E_y on helppo selvittää kartongin jänni-

tysvenymäkäyrästä. Loput voidaan selvittää käyttämällä likimääräisiä arvoja. Matriisi selittää pohjan kartongin puristus- ja jäykkyysominaisuuksille. [16]

Kartongin puristuslujuus on paljon heikompi kuin vetolujuus. Kuvassa 4. on esitetty tyypillinen kartongin jännitys-venymäkäyrä puristuksessa ja venytyksessä, kone- ja poikkisuunnassa.



Kuva 4. Kartongille tavallinen jännitys-venymäkäyrä vedossa ja puristuksessa. [8]

Puristuslujuus testit ovat tärkeimmät aaltopahvin materiaalikomponenteille tehtävät testit. Kartongin puristuslujuus riippuu suurimmaksi osaksi testikappaleen koostumuksesta ja hoikkuusluvusta. Hoikkuusluku määräytyy testikappaleen suhteellisista dimensioista:

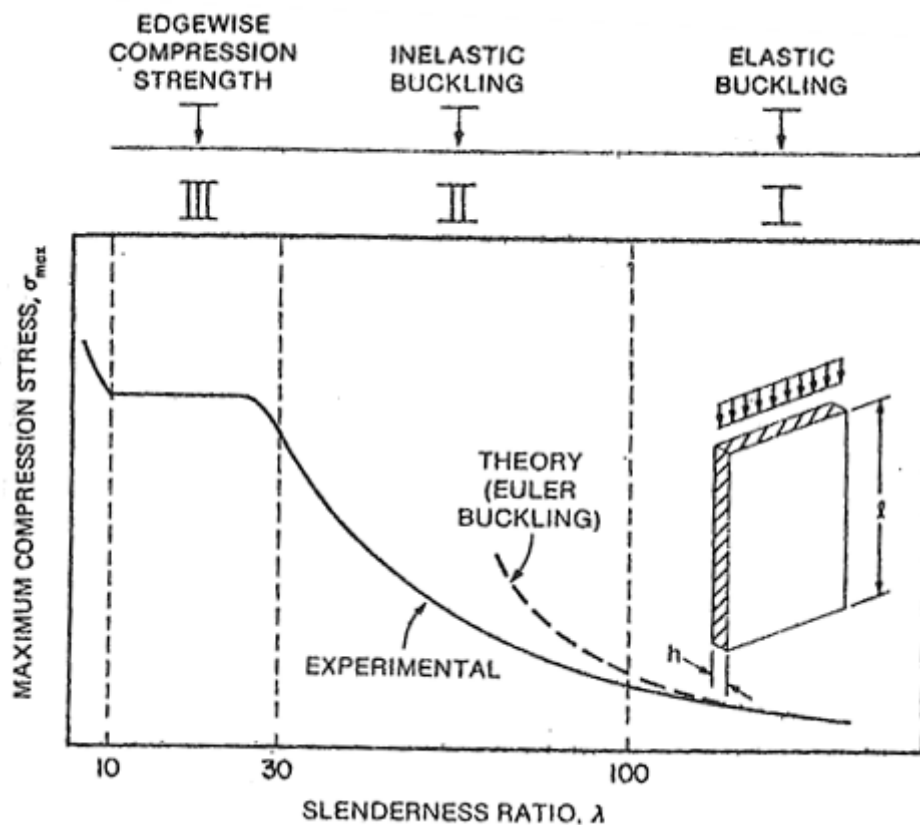
$$\lambda = 2 \sqrt{3} l/h \quad (3)$$

missä λ = hoikkuusluku

l = koepalan korkeus (ilman tukea jäävä osa), mm

h = koepalan paksuus, mm

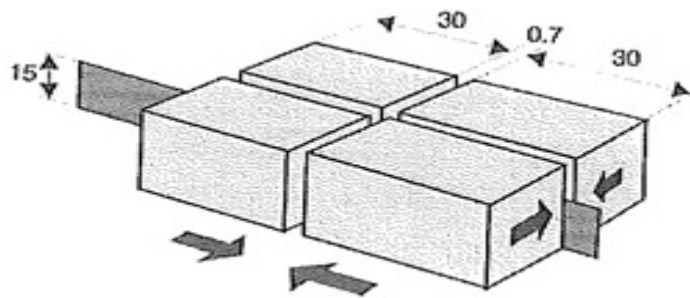
Puristuskäyttäytyminen riippuu hoikkuusluvusta. [17, 18] Kun testikappaletta puristetaan, se luhistuu hoikkuusluvusta riippuen eri tavalla. Hoikkuusluvun pienentyessä, siirtyy testikappale asteittain nurjahtamisesta puhtaaseen puristukseen. Kuvassa 5 näkyy puristuskäyttäytymisen riippuminen hoikkuusluvusta. Alueella I koepala nurjahdaa elastisesti. Alueella II tapahtuu elastisen nurjahduksen lisäksi pysyviä muodonmuutoksia. Alueella III ei koepala nurjahda. Tällöin kyseessä on puhdas puristustapahtuma. [18]



Kuva 5. Puristuslujuuden riippuminen hoikkuusluvusta. [18]

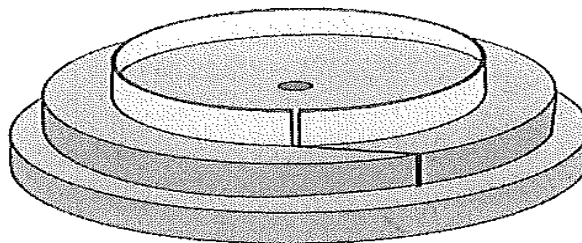
Aallotuskartongin ja linerin puristuslujuutta mitataan, jotta voidaan jo materiaalien valmistusvaiheessa tutkia ja ennustaa aaltopahvin mahdollista lujuutta ja laattikon puristus- ja pinoamiskestävyyttä. Puristuslujuutta mittaavat testit voidaan jakaa aallotuskartongin testeihin ja linerien testeihin. Aallon litistyslujuus CMT (Concora Medium Test) ja poikkisuuntainen puristuslujuus CCT (Corrugated Crush Test) mittaavat aallotuskartongin ominaisuuksia [1, 3]. CLT (Concora Liner Test) on lainereille tarkoitettu testausmenetelmä. SCT:tä (Short Span Compression Test) ja RCT:tä (Ring Crush Test) käytetään molempien raaka-aineiden mittaamiseen. [1, 19]

SCT (Short Span Compression Test) on erilainen kuin muut puristustestit [19]. Siinä testiliuska asetetaan kahta puolta leukojen väliin ja kartonki liuska tyssätään vain 0,7 mm pitkässä vapaassa välissä [1]. SCT mittaa kartongin todellisen puristuslujuuden, sillä liuska ei pääse nurjahtamaan. Muissa testeissä tapahtuu enemmän tai vähemmän nurjahtamista. [20, 21, 22] SCT toimii hyvin sekä lainerien että aallotuskartongin puristuslujuuden mittaamiseen. [19] Ongelma on että SCT testiin vaikuttaa todella voimakkaasti pienikin testiliuskaan osunut epäkohta kartongilla. Tällöin pätevää kokonaiskuvaa kartongin puristuslujuudesta on vaikeaa saavuttaa. [23] Kuvassa 6 on SCT-puristus esiteltynä.



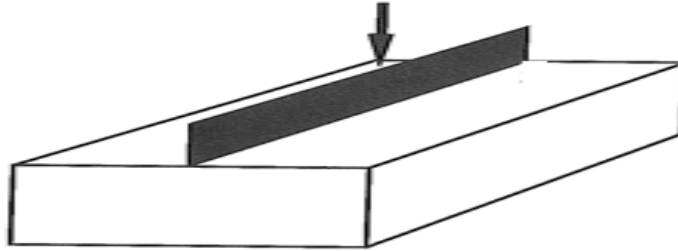
Kuva 6. SCT puristin. [1]

Rengaslitistyslujuustestiä RCT:tä (Ring Crush Test) käytetään lähinnä pintakartonkien, lainereiden puristuslujuuden mittaamiseen. Se soveltuu kuitenkin myös aallotuskartonseille. [1] Siinä mitataan voimaa, jolla kartonki vastustaa litistymistä. [23] Testi voidaan tehdä sekä kone- että poikkisuunnassa. [19] Valmiissa aaltopahvilaatikoissa kuormitus kohdistuu aallotuskartongin ja lainerin poikkisuuntaan. Eli tämän suunnan puristumiseneston tutkiminen kartongeista on mielekkäämpää. [19] Kuvassa 7 kartongin testiliuska RCT pidikkeessä.



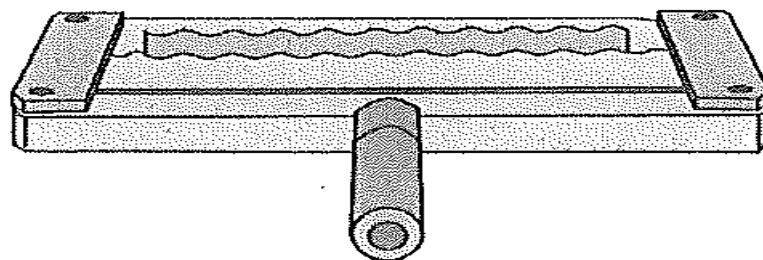
Kuva7. RCT testi [1]

CLT (Concora Liner Test) testi on pitkälti samanlainen kuin RCT. Erona on että kartonkiliuska ei ole puristettaessa ympyrä muotoon taivutettu vaan suora. CLT:tä käytetään lainerien puristuslujuuden mittaamiseen. Samalla tavoin kuin RCT:ssä myös CLT:ssä voidaan testata kartonki niin kone- kuin poikkisuuntaan. Kuitenkin tulosten käytettävyyden kannalta poikkisuunta on mielekkäämpi. [19] Kuvassa 8 on CLT testiliuska pidikkeessä.



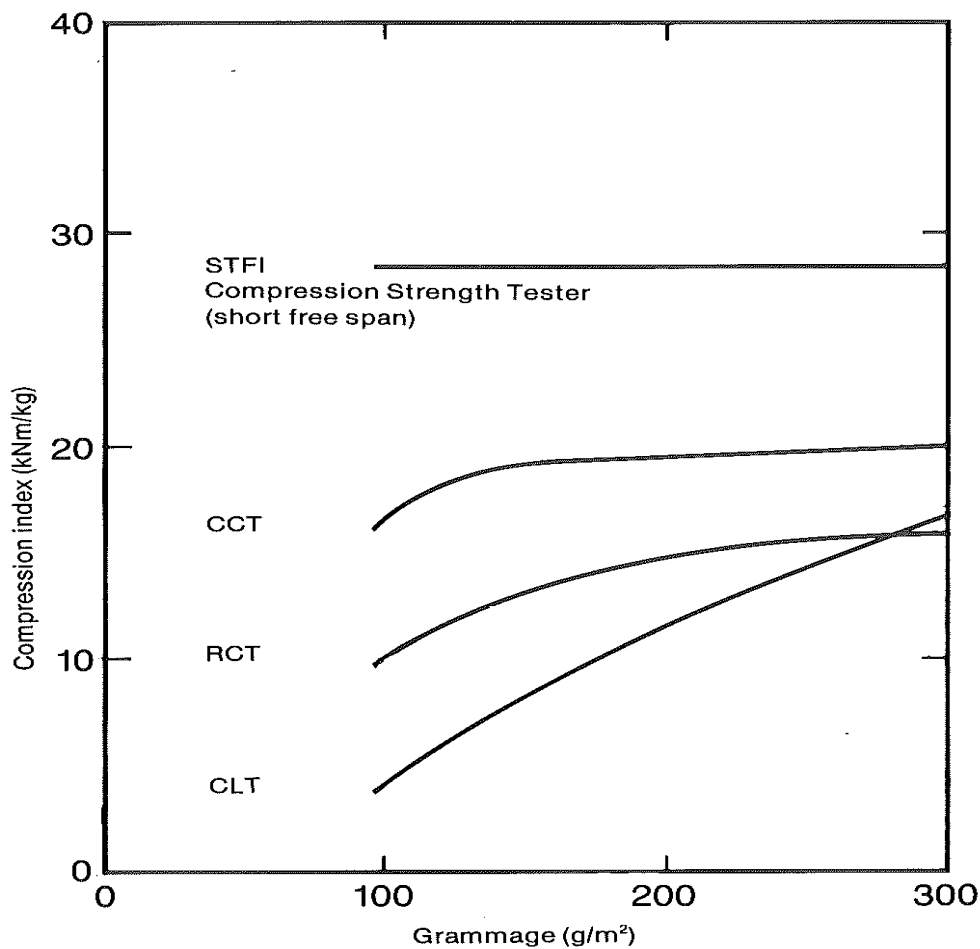
Kuva 8. CLT testi [19]

Käytetyin mittaustapa aallotuskartongin poikkisuuntaisen puristuslujuuden määrittämiseen on CCT (Corrugated Crush Test). Siinä testattava kartonkiliuska ensin aallotetaan laboratorioaallottajalla (Concora). [1] Tällöin testi kuvaa paremmin aallotuskartongin todellista poikkisuuntaista puristumista aaltopahvilaatikon kantavilla sivuilla. CCT on ehkä tärkein aaltopahvin materiaalille tehtävä mittaus, sillä se kuvaa poikkisuuntaista puristusta. Poikkisuuntaisella puristuslujuudella on suora yhteys aaltopahvin reunanlitistyslujuuteen ECT:n ja aaltopahvilaatikon puristuslujuuteen BCT:n. [19] CCT-testissä näyteliuskan geometria estää suurelta osin nurjahduksen. Tästä syystä puristuslujuus on CCT:n kannalta tärkeämpi ominaisuus kuin taivutusjäykkyys. Eli CCT riippuu enemmän kartongin kimmokerrotoimesta kuin liuskan paksuudesta. [22] Kuvassa 9 on kartongin testiliuska CCT pidikkeessä.



Kuva 9. CCT testi [1]

Poikkisuuntaista puristuslujuutta mittaavat testit aallotuskartongilla antavat hiukan eri tuloksia testistä riippuen. Kuvassa 10 on vertailtu SCT- (STFI), CCT-, RCT- ja CLT-puristustestien tuloksia neliömassan funktiona. Kuvaajassa puristustulokset on indeksoituja eli teoreettisesti riippumattomia neliömassasta. CLT- ja RCT-testien arvot kasvavat selvästi neliömassan kasvaessa. Tämä selittyy, sillä että matalilla neliömassoilla testeillä esiintyy voimakkaasti nurjahtamista puristuksen yhteydessä. CCT-testi antaa saman arvon neliömassan muuttuessa, mutta arvot ovat paljon matalammat kuin SCT-testillä määritellyt. Osa CCT-testin heikommista arvoista selittyy aallotuksen aiheuttamilla vaurioilla. Pääasiassa SCT:n korkeat arvot kuitenkin johtuvat siitä, että näytepalan nurjahdus on täysin estetty. SCT kuvaa täysin puhdasta puristuslujuutta. [24] Kuitenkin mitattaessa puristusta todellisesta aaltopahvista esiintyy puristustapahtuman yhteydessä aina myös nurjahdus. Aaltopahvin ja aaltopahvilaatikon puristus ei siis ole puhdas puristustapahtuma. SCT-testin tulokset eivät vastaa yhtä hyvin todellisuutta myöskään siksi, ettei näyteliуска ole plastisoitunut niin kuin CCT-testissä. Sillä sitä ei ole aallotettu. [25]



Kuva 10. Puristus indeksi neliömassan funktiona SCT-, CCT-, RCT- ja CLT-testeillä. [24]

Aallon litistyslujuus testi CMT (Concora Medium Test) testaa, miten hyvin aallot vastustavat litistymistä, kun niiden harjoja puristetaan. Se kuvaa aallotuskartongin kykyä pitää lainerit halutun etäisyyden päässä toisistaan. Testi on suoraan verrannollinen aaltopahvin FCT:n (Flat Crush Test) [1]. CMT:stä on esitetty kaava:

$$\text{CMT} = f(\text{KE}e^2G) \quad (4)$$

missä K = vakio

E = kimmokerroin, N/m^2

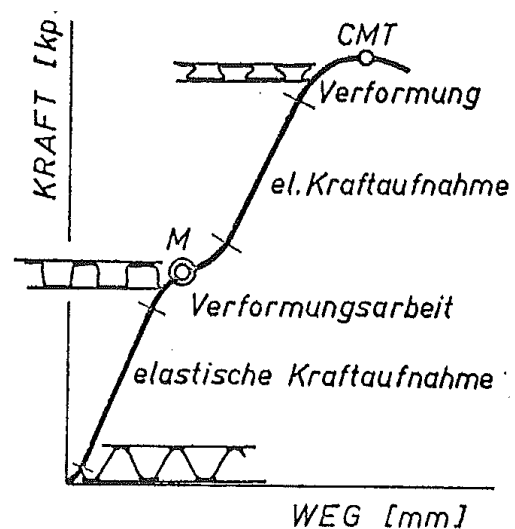
e = paksuus, m

G = neliömassa, m^2

Tämän perusteella paksuudella on erittäin suuri vaikutus litistyslujuuteen. Lisäksi myös taivutusjäykkyydellä, kartongin kimmokertoimella ja neliömassalla on merkitystä. [26]

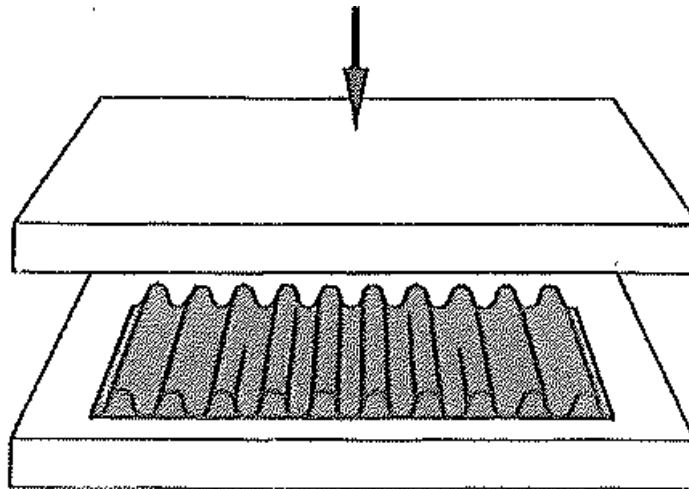
Kuvassa 11 on CMT:n puristuskäyrä. Käyrässä näkyy kaksi maksimi kohtaa yhden sijaan. Välipisteessä aallot ovat puristuneet kasaan niin että aaltojen poikkeileikkaus on suorakaide. Tällöin aallon seinämät antavat aaltopahville suurimman tuen. Puristusta edelleen jatkettaessa koepala menettää aaltopahvin luonteen. Vaikka CMT-arvot eri aallotuskartongeilla olisivat samat, voivat välipisteen arvot poiketa huomattavasti toisistaan. [25]

Kuva 11. CMT-puristuskäyrä. Käyrällä esiintyy 2 puristuskäyrän maksimia. 1. maksimilla kutsutaan CMT:n välipistettä. 2. maksimi on perinteinen CMT-mittauksen arvo. [27]



Aallotuskartongin laatua on tämän perusteella tärkeämpi seurata välipisteen tuloksesta kuin lopullisesta CMT-arvosta. CMT-testi antaa kuitenkin hyvän yleiskuvan aallotuskartongin lujuudesta. Tärkein mitattava asia CMT:llä on, miten hyvin aallotuskartonki ylläpitää aaltopahvin paksuutta jatkojalostuksen aikana. [1, 28, 29]

CMT-arvot voidaan mitata joko CMT0- tai CMT30-arvoina. CMT0-määrittelyssä maksimikuormitus mitataan heti aallotuksen jälkeen ja CMT30:n kohdalla näytettä ilmastoidaan aallotuksen jälkeen vakio-olosuhteissa 30 minuuttia. [30, 31] CMT0:n arvot ovat noin 30 % korkeammat kuin CMT30 [19]. Tämä johtuu siitä, että heti aallotetulla kartonkiliuskalla on matalampi kosteuspitoisuus ja näin ollen korkeampi jäykkyys kuin olosuhteisiin sopeutuneella. [31] Kuvassa 12. on esitetty CMT-puristustesti. Testissä aallotuskartonkiliuska on ensin aallotettu laboratorioaallottajalla (Concora), ja sen jälkeen asetettu muottiin ja teipattu aallonharjoilta.



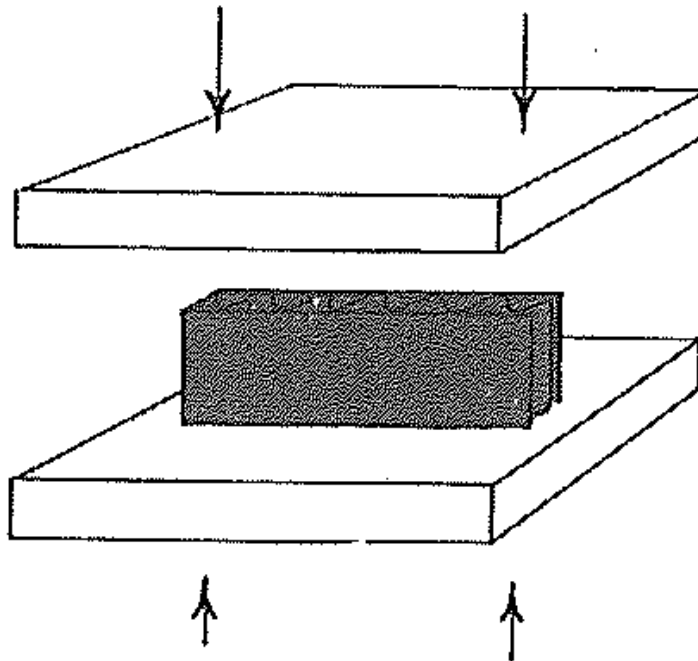
Kuva 12. CMT testi. [33]

3.2 Aaltopahvin testaus

Aaltopahvin täytyy olla lujaa ja jäykkää, jotta sitä voidaan rakentaa käsittelyä ja pinoamista kestävä laatikko. Aaltopahvin jäykkyys muodostuu reunanlitistyslujuudesta ECT (Edge Crush Test), taivutusjäykkyydestä ja litistyslujuudesta FCT (Flat Crush Test). [22]

3.2.1 ECT reunanlitistyslujuus

Aaltopahvin reunanlitistyslujuus ECT (Edge Crush Test) on tärkein ominaisuus kuvaamaan laatikon puristuslujuutta [32] ja näin ollen aaltopahvia [20, 24]. ECT:llä testataan aaltopahvin kykyä estää aaltopahvin puristumista ja ylläpitää muotonsa, kun aaltoja vastaan kohdistuu pystysuora voima. Rasitus kuvaa hyvin laatikoiden pinoamista päällekkäin. [1, 20, 19, 24] ECT kuvaa myös kuljetukseen liittyvää käsittelyä [24] sekä laatikon valmistuksen laatua [32]. Kuvassa 13 on kuvattu ECT testi.



Kuva 13. ECT testi. [1]

ECT on aaltopahvin komponenttien, aallotuskartongin ja lainerien, poikkisuuntaisten puristuslujuuksien summa. [25, 33] Se riippuu lainerien ja aallotuskartongin puristuslujuudesta seuraavasti:

$$ECT = k * (CTI + a * CTf) + b \quad (5)$$

missä CTI = lainerien puristuslujuuden summa, kN/m

CTf = aallotuskartongin puristuslujuus, kN/m

a = aaltoprofiilin aallotuskerroin

k, b = kokemuseräisiä vakioita

Lainerien ja aallotuskartongin puristuslujuuksia voidaan mitata monella tavalla. Yleisesti ottaen paras korrelaatio mitatun ja ennustetun ECT:n välille saadaan, kun laskemisen perustana käytetään RCT (Ring Crush Test) - ja CCT (Corrugated Crush Test) - menetelmillä mitattuja kartonkien puristuslujuusarvoja. [6, 25] Kaavalla 6. ECT on laskettu 1-aaltoiselle aaltopahville ja kaavalla 7. 2-aaltoiselle aaltopahville. [6, 34]

1-aaltoiset pahvit:

$$ECT = 0,73 * (RCT_{sf} + RCT_{db} + a * CCT_{flu}) + 1,60 \quad (6)$$

2-aaltoiset pahvit:

$$ECT = 0,69 * (RCT_{sf} + RCT_{ml} + RCT_{db} + a_1 * CCT_{flu1} + a_2 * CCT_{flu2}) + 2,27 \quad (7)$$

missä sf (single face) = pintalineri

db (double back) = pohjalineri

ml (middle) = keskilineri

flu = aallotuskartonki

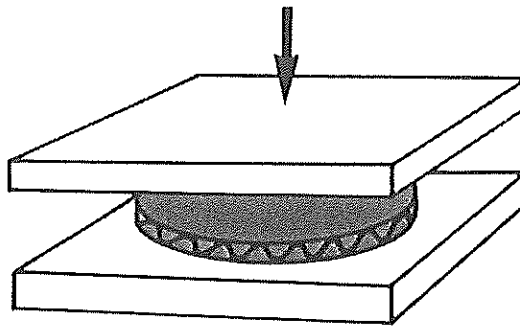
RCT ja CCT voidaan korvata SCT-mittauksella. Siinä näytepalan nurjahdus on estetty ja sen katsotaan siten paremmin kuvaavan puhdasta puristuslujuutta. [43, 44, 60] Toroi ja Kainulainen ovat kuitenkin saaneet paremman korrelaation käyttämällä RCT- ja CCT-arvoja, kaavat (6) ja (7). [6, 25, 34, 35] Vaikka RCT- ja CCT-testissä testikappaleet pääsevät joskus nurjahtamaan, antavat ne todenperäisimmät arvot. Syy on se, että myös aaltopahvia puristettaessa tapahtuu usein nurjahdus, eikä sekään ole täysin puhdas puristustapahtuma. [25]

Aaltopahvin rakenteella on vaikutusta ECT:n. Aaltopahvin symmetrisyydellä ei kuitenkaan ole merkitystä, ellei aallotuskartongin ja lainereiden neliömassan ero ole erityisen suuri. ECT:n kannalta aallotuskartongin on hyvä olla mahdollisimman painavaa suhteessa lainereihin. Aaltoprofiilin vaikutuksen huomioiminen on riittävää, kun puristuslujuus kerrotaan aallotuskertoimella. [6]

ECT:n mittaamiseen on monta standardia: FEFCO, TAPPI, ISO, EN ja SCAN. Eri standardeilla on hiukan erimuotoiset testikappaleet ja ne leikataan erilaisilla leikkureilla. Tulokset vaihtelevat eri standardien välillä, mikä aiheuttaa hämmennystä ja epätarkkuutta. [1, 20, 24, 36]

3.2.2 FCT litistyslujuus

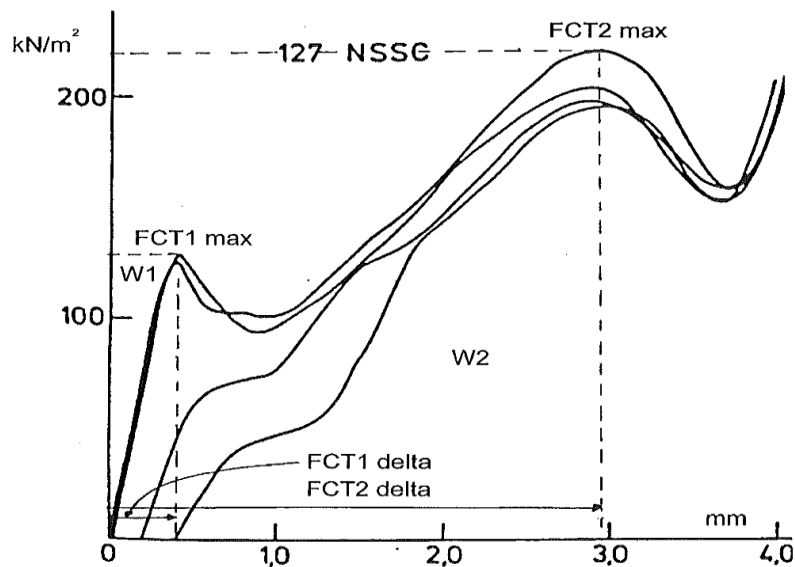
Litistyslujuus FCT testaa aaltopahvin kykyä vastustaa voimaa, joka osuu kohtisuoraa aaltojen harjoihin. Testi soveltuu vain yksiaaltoiselle aaltopahville. FCT kuvaa aallotuskartongin lujuutta, aallotuksen onnistumista sekä sitä miten hyvin aallotettu kartonki ylläpitää muotonsa jatkojalostuksessa. [1, 19, 28] FCT:llä on suuri merkitys taivutusjäykkyyteen. Mitä parempi FCT, sitä paremmin aallotuskartonki ylläpitää lainerien välistä etäisyyttä. Eli aaltopahvi säilyttää paksuutensa. [37] Kuvassa 14 on FCT puristusmittaus.



Kuva 14. FCT testi. [1]

Mitatessa FCT:tä testikappaletta puristetaan kahden kiekon välissä kunnes aallot murtuvat. Todellisessa elämässä aaltopahvi ei koskaan koe niin voimakasta puristusta, että aallot murtuvat jos aallotus on tehty onnistuneesti. FCT-testissä aallot kuitenkin kaatuvat helposti jos puristuslevyt ovat vähääkään vinossa. Tämä näkyy heti heikoissa tuloksissa. Testin perusteella ei ole onnistuttu johtamaan minkäänlaisia pinoamislujuuksia kuvaavia kaavoja. [1] FCT on riippuvainen vain CMT-mittauksen tuloksista. [5, 14, 30]

FCT:n puristusvoima-kuvaajassa ei ole ainoastaan yksi huippu vaan kaksi huippua. Samalla tavoin kuin CMT:n puristusvoima-kuvaajassa. Ennen ensimmäistä huippua ollaan elastisella alueella. Tällöin puristuksen aiheuttama muodonmuutos aallotuskartongissa ei ole pysyvää. Toinen huippu kuvaa FCT-testissä saatavaa tulosta. Tällöin aallot ovat murskattuja ja aaltopahvin paksuus pienentynyt. FCT-käyrän ensimmäistä huippua kutsutaan aallotuskartongin välipisteeksi. Tässä pisteessä aaltopahvi ei ole vielä menettänyt paksuuttaan, mutta sen rakenne on selvästi heikentynyt. [1, 28, 29] Kuvassa 15 on FCT:n puristuskäyrä esitettyä.

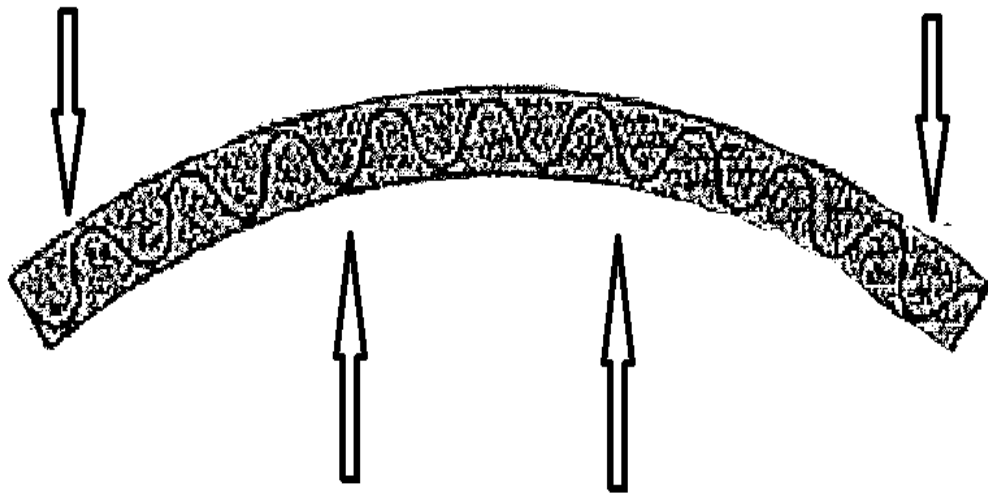


Kuva 15. Aaltopahvin puristusvoima – litistymäkuvaaja eri litistymämäärien jälkeen. Litistysmääriä ovat: 0%, 5% (0,25 mm), 21 % (1,0 mm), ja 31% (1,5 mm). FCT 1 max on aallotuskartongin välipiste ja FCT 2 max on FCT puristuksen arvo. [29]

Vaikka aaltopahvia puristettaisiin niin, että aallot menevät kasaan, sen melkein koko paksuus palautuu. Näin ollen ajatellaan, että aaltojen lujuusominaisuudet eivät ole kärsineet. Tämä ei pidä paikkaansa. Aaltojen muoto on kärsinyt ja erityisesti aaltojen kyljet ovat saaneet vaurioita. [38] Ne ovat pehmeämmät ja heikommät. Jopa käsin tunnustelemalla aaltopahvin voi tuntea olevan pehmeämpää eikä se ylläpidä lujuusominaisuuksiaan halutulla tavalla. [37] Aaltojen pehmeneminen johtuu siitä, että kerran taipunut aalto menettää leikkauslujuuttaan. Tällöin aaltopahvi menettää monia ominaisuuksia. Se ei ylläpidä yhtä hyvin paksuuttaan jatkojalostuksessa. Suurin haitta näkyy kuitenkin aaltopahvin eliniässä ja sen lujuusominaisuuksissa lämpimissä ja kosteissa olosuhteissa. [26, 29, 38] Tämän kaltaista vahingoittumista ei aaltopahvista voi nähdä paksuuden menetyksenä tai FCT-arvona. Parhaiten välipisteen näkee FCT:n puristuskäyrästä. Välipiste olisi paljon tarkempi ja hyödyllisempi mitata kuin FCT. Tällöin saataisiin tietoa aaltopahvin kestävyyydestä todellisessa elämässä. [38]

3.2.3 Taivutusjäykkyys

Aaltopahvin sivupaneelien taivutusjäykkyys vaikuttaa ECT:n ja laatikon dimensioiden ohella laatikon puristuslujuuteen [7]. Taivutusjäykkyys muodostuu melkein kokonaan lainereiden taivutusjäykkyyksistä. Lainereiden neliömassa ja aaltopahvin paksuus vaikuttavat siihen eniten. Aallotuskartongin taivutusjäykkyyden ja neliömassan vaikutus aaltopahvin taivutusjäykkyyteen on todella vähäinen. 1-aaltoisella aaltopahvilla lähes olematon. Ainoastaan koneen poikkisuunnassa aallotuskartongin taivutusjäykkyydellä on hiukan vaikutusta [35]. Aallotuskartongin päätehtävä on pitää linerit erillään ja tuoda mahdollisimman paljon paksuutta aaltopahviin. [6, 7, 25, 35] Kokonaispaksuus aaltopahvilla muodostuu aallotuskartongin aaltoprofiilista ja siitä, miten hyvin aallotuskartonki ylläpitää linerien etäisyyden jatkojalostusvaiheessa. [6, 25] Aaltopahvin taivutusjäykkyyttä mitataan nelipistemenetelmällä. [6, 24] Kuvassa 16 esitetään nelipistemenetelmä.



Kuva 16. Taivutusjäykkyyden mittaaminen nelipistemenetelmällä [39]

Paperin ja kartongin taivutus voidaan rinnastaa palkin taivutukseen. Tämän perusteella taivutusjäykkyys voidaan laskea aaltopahvin paksuuden, eri aaltokerrosten kimmo-ominaisuuksien ja aaltoprofiilin eli aaltopahvin paksuuden perusteella. [6, 40, 25]

$$D = \Sigma E * I \quad (8)$$

missä E = kimmokerroin, N/m^2

I = hitausmomentti ($= d^3/12$), m^3

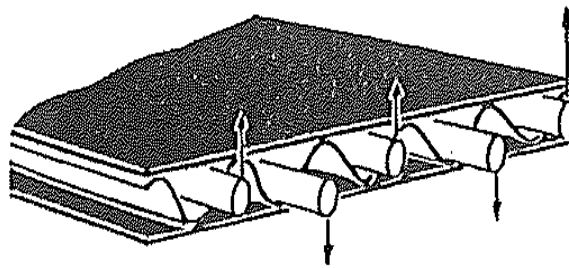
d = paksuus, m

D = kerrosrakenteen taivutusjäykkyys, Nm

Kartongin taivutusjäykkyys riippuu siis vain kimmokertoimesta ja hitausmomentista eli paksuuden kolmannesta potenssista. [41, 42] Kun kartonkia taivutetaan, sen kupera puoli joutuu venymään ja kovera puoli puristumaan kokoon. Näiden välillä on taso, joka ei veny eikä puristu. Tämä on niin sanottu neutraalitaso. Mitä kauempana ollaan kartongin neutraalitasosta sitä suurempi on hitausmomentti. Eli sitä suurempi on kartongin paksuus ja kimmokerroin. [42] Rakenteella on siis helppoa lisätä aaltopahvin taivutusjäykkyyttä. Tällöin lisätään vain kokonaispaksuutta. Myös lainerien neliömassan kasvattaminen lisää taivutusjäykkyyttä. Aallotuskartongin osuus on pieni. Aaltokerros vaikuttaa vain paksuudellaan, ei materiaaliominaisuuksillaan. Aallotuskartongin täytyy vain olla tarpeeksi ryhdikästä pitääkseen lainerit erillään. Monikerroksisessa aaltopahvissa aaltokerrokset ovat jo kauempana neutraalitasosta. Tällöin myös aallotuskartongin ominaisuuksilla alkaa olla merkitystä. [6]

3.2.4 PAT liimasauman lujuustesti

Aaltopahvista mitataan puristuslujuuksien lisäksi myös liimasauman lujuutta. Laaduntarkkailu prosessin aikana tehdään aaltopahvikoneella, kun prosessinhoitaja ottaa juuri valmistuneesta aaltopahviarkista kartongit irti toisistaan ja tekee heti johtopäätökset liimasauman lujuudesta. Kun tarvitaan tarkempaa tietoa, tehdään laboratoriossa ilmastoiduista testiliuskoista liimasauman lujuus-testi PAT-menetelmällä (Pin Adhesion Test). Testissä aaltopahviliuskan aaltojen väliin pujotettujen puikkojen avulla liimasauma revitään auki ja maksimi voima mitataan. [1] Kuvassa 17 PAT-testi.



Kuva 17. PAT-testi liimasauman lujuuden määrittämiseen. [1]

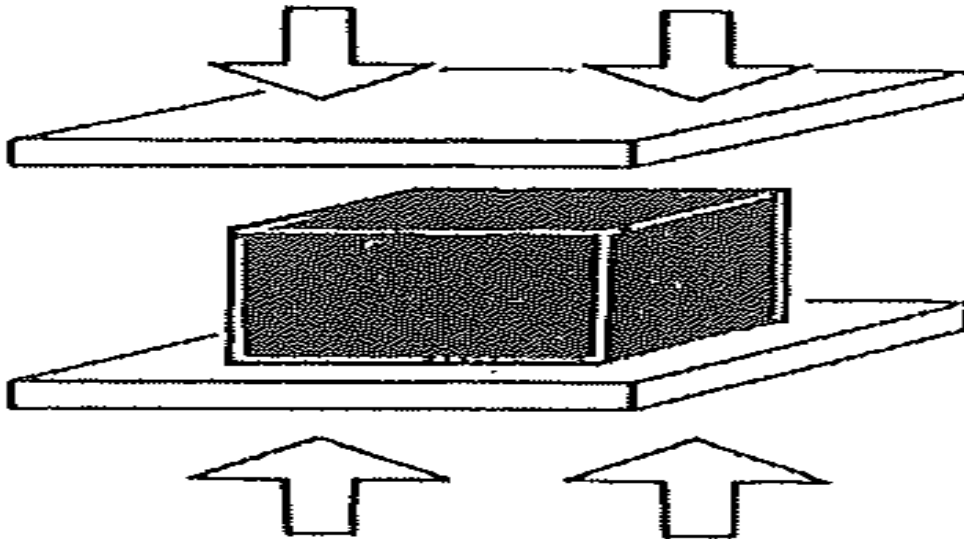
Aaltopahvista mitataan samalla tavoin kuin aallotuskartongista ja lainerista puhkaisulujuus, neliömassa, paksuus ja kitka, mutta nämä on käsitelty jo raaka-aine puolella.

3.2.5 Uudet mittaustavat

Poikkisuuntaisen leikkausjäykkyyden määrittämistä on esitetty uudeksi tavaksi testata aaltopahvin pinoamislujuutta. Poikkisuuntaisella leikkausjäykkyydellä tarkoitetaan sitä voimaa, joka estää laatikon seinämiä nurjahtamasta ulospäin laatikon ollessa taakan alla. Poikkisuuntaista leikkausjäykkyyttä voitaisiin erityisesti hyödyntää jatkojalostuksen, kuten painatuksen, stanssauksen ja nuuttauksen aiheuttamien lujushäviöiden mittaamisessa. Yleensä jatkojalostuksen aiheuttamia lujushäviöitä mitataan paksuuden vähentymisenä. Kuitenkin paksuuden vähentyminen on todella pienimittakaavaista verrattuna poikkisuuntaisen leikkausjäykkyyden menetykseen. Poikkisuuntaista leikkausjäykkyyttä voidaan mitata vetolujuusmittarin mukaelmalla, missä aaltopahvin vastakkaiset pinnat vedetään eri suuntiin. Toisessa versiossa tutkijat ovat käyttäneet vääntöheiluri-mittausta. Täysin uusi innovaatio on BQM-määritys (Board Quality Measurement). Siinä näytekappale asetetaan tukien varaan ja testilaite aiheuttaa ääniaaltoja matalilla frekvensseillä. Anturi on kiinnitetty testikappaleen toiseen päähän ja mittaa värähtelevän aaltopahvin frekvenssin ja amplitudin. Niiden perusteella voidaan laskea poikkisuuntainen leikkausjäännitys. [38, 43, 44]

3.3 Aaltopahvilaatikon testaus

Aaltopahvilaatikon tärkein ominaisuus on pinottavuus. Aiemmin tärkeimpänä ominaisuutena pidettiin käsittelynkestävyyttä, mutta nykyisin pinottavuus on noussut tärkeimmäksi huomioonotettavaksi ominaisuudeksi. Tämä johtuu siitä, että nykyisin aaltopahvilaatikoita pinotaan useita päällekkäin ja varastointiajat ovat kasvaneet erittäin pitkiksi. [6, 1] Laatikoiden pinottavuutta kuvataan parhaiten laatikon puristuslujuus testillä BCT:llä (Box Compression Test). BCT:llä mitataan kuinka suuri paino pinon alimpaan laatikkoon voidaan kohdistaa ilman, että se hajoaa. [24, 25] Kuvassa 18 on esitetty puristuslujuustesti BCT.



Kuva 18. laatikon puristuslujuustesti BCT. [1]

Laatikon puristuslujuuteen vaikuttavat aaltopahvin puristuskestävyys, joka mitataan reunanlittistyslujuudella (ECT), sivupaneelien taivutusjäykkyys ja laatikon dimensiot. [6, 25, 35] BCT:n laskemiseksi on useita eri malleja. McKee et al. ovat esittäneet yleisimmin käytössä olleen laatikon puristuslujuutta kuvaavan kaavan (9). [35, 45, 46]

McKeen alkuperäinen kaava:

$$BCT = a ECT^b * FR^{1-b} * Z^{2b-1} \quad (9)$$

missä FR = kone- ja poikkisuuntaisen taivutusjäykkyyden geometrinen keskiarvo, $FR = \text{neliöjuuri } S_{b,MD} * S_{b,CD}$

S_b = aaltopahvin jäykkyys, Nm

Z = laatikon piiri, mm

ECT = aaltopahvin ECT, kN/m

BCT = laatikon puristuslujuus, N

Vakio $b = 0,75$ ja vakio a riippuu käytettyjen suureiden yksiköistä

Aaltopahvin taivutusjäykkyyttä ei tavallisesti tiedetä ja usein käytetään ns. yksinkertaistettua McKeen kaavaa (10): [6]

$$BCT = k * ECT^a * d^b * (L+B)^c \quad (10)$$

missä k, a, b ja c ovat kokemuseräisiä vakioita

d = aaltopahvin paksuus, mm

L = laatikon pituus, mm

B = laatikon leveys, mm

ECT = aaltopahvin ECT, kN/m

BCT = laatikon puristuslujuus, N

McKeen kaava on yleisesti hyväksytty ja käytetty teollisuudessa, sillä se kuvaa hyvin laatikon puristuvuutta ja toisaalta myös paperitekniisiä ominaisuuksia. Sillä on vahva teoreettinen pohja, mutta sen vakiot on testattu empiirisesti kokeilemalla. [34] McKeen kaavaa käytettäessä tulisi kuitenkin muistaa, että McKeen kaavalla laskettuna saadaan laatikon potentiaalinen puristuslujuus. Eli puristuslujuus, joka täydellisesti valmistetulla laatikolla olisi. Usein laatikon valmistuksessa ja testauksessa esiintyy poikkeamia, joita kaava ei ota huomioon. [35]

Kainulainen ja Toroi ovat aiempia tutkimuksia yhdistämällä [6, 14] saaneet kaavojen (9) ja (10) kertoimille arvot alkuperäiseen McKeen yhtälöön (11): [6]

$$BCT = 405 * ECT^{0,75} * (S_{md} * S_{cd})^{0,125} * (L+B)^{0,5} \quad (11)$$

Yksinkertaistettua tyyppiä oleviksi kaavoiksi saatiin yksi- ja kaksiaaltoiselle aaltopahvilaatikonleveydelle seuraavat

Yksiaaltoiset:

$$BCT = 5,85 * ECT^{1,00} * d^{0,85} * (L+B)^{0,5} \quad (12)$$

Kaksiaaltoiset:

$$BCT = 5,85 * ECT^{0,86} * d^{0,86} * (L+B)^{0,5} \quad (13)$$

Puristuslujuuden kolmen tekijän: ECT:n, sivupaneelien taivutusjäykkyuden ja laatikon dimensioiden suhde on vaikea ja monimutkainen. Kaikki niistä vaikuttavat toisiinsa. Aaltopahvin rakenteen optimoinnin kannalta on tärkeää tietää kumpi ominaisuuksista, ECT vai taivutusjäykkyys vaikuttaa voimakkaammin. [6, 25] Tämän selvittämiseksi on johdettu teoreettiselta pohjalta menetelmä aaltopahvilaatikon puristuslujuuden laskemiseksi. [6]

$$BCT = f(ECT, BE_{md}, BE_{cd}, L, B, H) \quad (14)$$

missä ECT = aaltopahvin ECT , kN/m

BE_{md} = konesuuntainen taivutusjäykkyys, Nm

BE_{cd} = poikkisuuntainen taivutusjäykkyys, Nm

L, B, H = laatikon mitat, mm

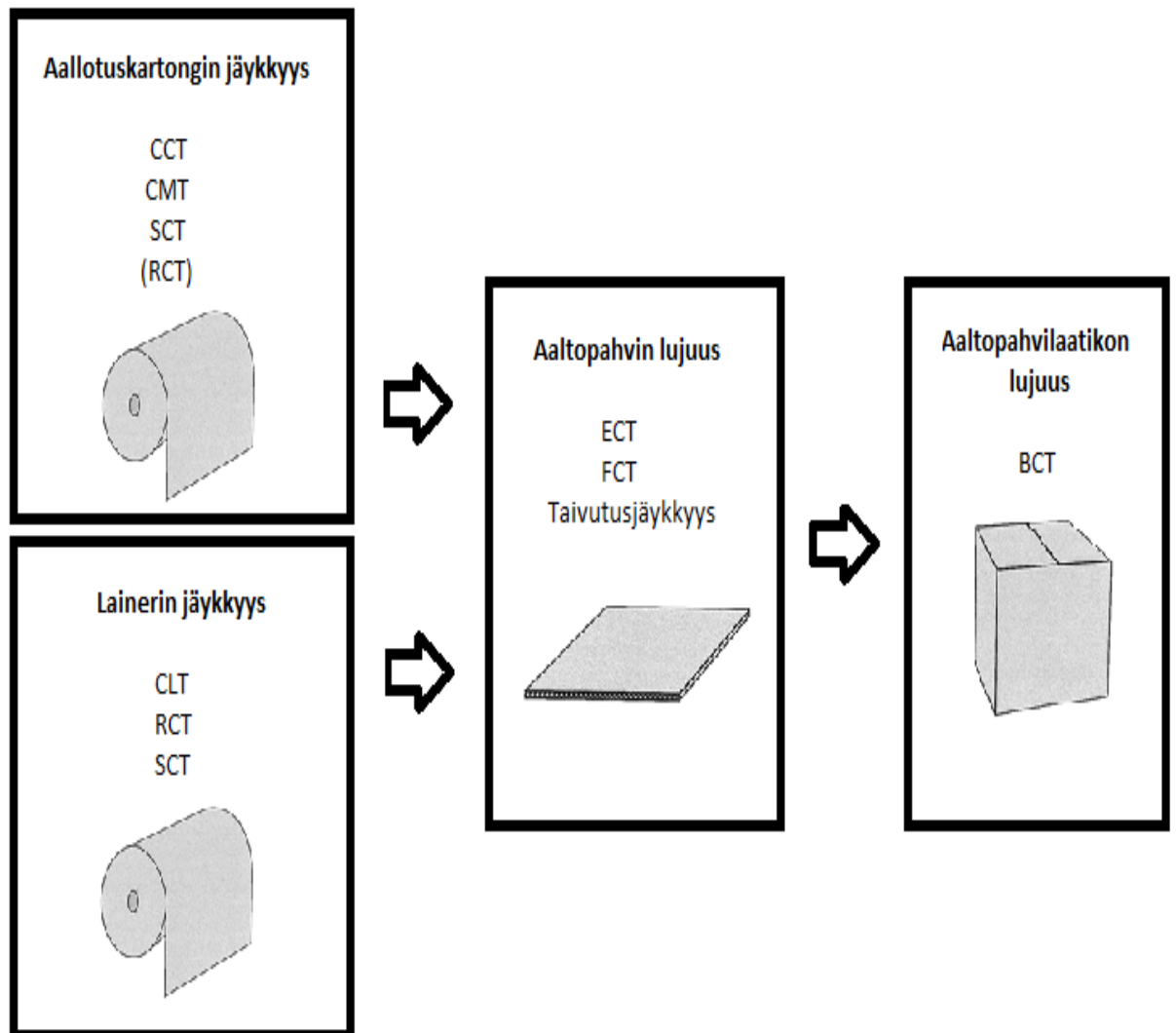
Eri tekijöistä havaittiin, että laatikon korkeudella on lähes olematon vaikutus ja poikkisuuntaisen taivutusjäykkyyden merkitys on paljon suurempi kuin konesuuntaisen. ECT ja taivutusjäykkyyden välinen määrävyys riippuu taas laatikon mitoista. Mitä suurempi laatikko, sitä suurempi on ECT :n vaikutus suhteessa taivutusjäykkyyteen. Pienissä laatikoissa ECT :n ja taivutusjäykkyyden suhteellinen vaikutus oli samaa suuruusluokkaa. [6]

BCT kuvaa hyvin laatikon käyttäytymistä. On kuitenkin monia tekijöitä todellisesta elämästä, joita BCT ei ota huomioon. Ilman suhteellisen kosteuden vaikutus ja vaikutuksen kesto, pitkäaikainen varastointi, dynaaminen vaihtelu kuljetuksen aikana sekä laatikoiden pinoamisessa tapahtuvat virheet. [1, 24]

Aaltopahvilaatikolle tehdään laatikonpuristuslujuus testin lisäksi myös muita pakauksen kestävyyttä ja tuotteen suojaavuutta mittaavia testejä. Esimerkkejä ovat erilaiset pudotus-, jyskytys- ja tärytestit. [1, 29] Pudotustestissä laatikko pudotetaan eri korkeuksista ja niin, että laatikko kohtaa esteen pohjallaan, kyljellään tai kulmallaan. Täry- ja jyskytystesteillä simuloidaan laatikkoon ja sen sisältöön kuljetuksen aikana kohdistuvia rasituksia. Testissä laatikko asetetaan tärypöydälle. Pöydän värinän taajuutta ja voimakkuutta säädetään esimerkiksi juna- tai rekka-kuljetusta vastaavaksi. Testin jälkeen laatikko avataan ja tarkastetaan pakattuun tuotteeseen tulleet vauriot. Jyskytystesti tehdään samalla tavoin, mutta värinän sijaan laatikkoon kohdistetaan tasainen isku. [47]

3.4 Mittausten kohtaaminen

Aaltopahvilaatikon ominaisuudet muodostuvat aaltopahvin ominaisuuksista, jotka taas suoraan johtuvat sen materiaalien aallotuskartongin ja lainerien ominaisuuksista. Kuvassa 18 on esitetty aaltopahvilaatikon lujuusominaisuuksien muodostuminen. Aallotuskartongin mittauksista CCT ja lainerin CLT korreloivat suoraan reunanlitistyslujuuden ECT:n kanssa. Aallotuskartongin CMT vastaa aaltopahvin litistyslujuus FCT:tä. Aaltopahvin lujuuden mittareista ECT:stä, taivutusjäykkyyydestä ja FCT:stä aaltopahvin paksuuden ylläpitäjänä taas muodostuu lopputuotteen aaltopahvilaatikon puristuslujuus.

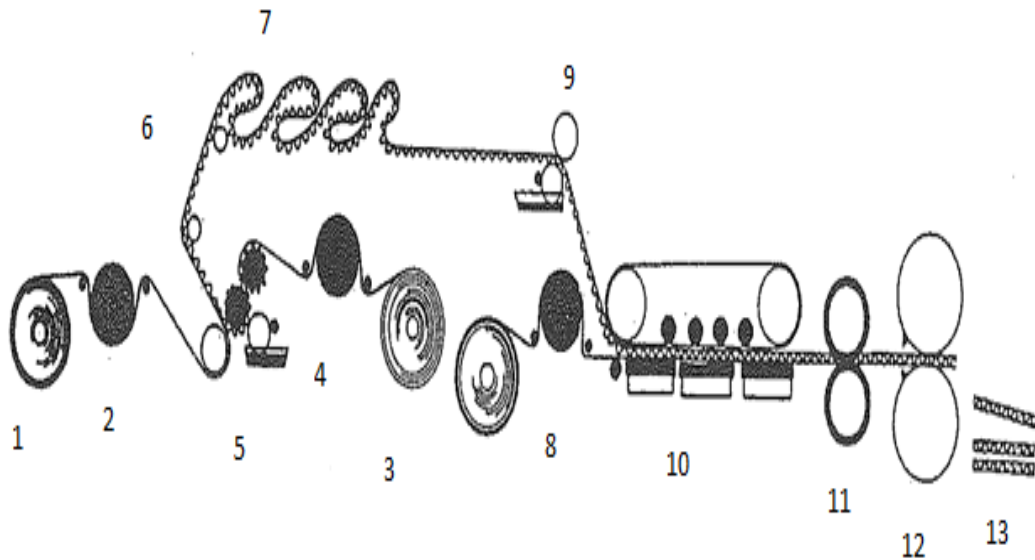


Kuva 19. Aaltopahvin materiaalien aallotuskartongin ja lainerien, aaltopahvin sekä aaltopahvilaatikon ominaisuuksien kohtaaminen.

4 AALLOTUS

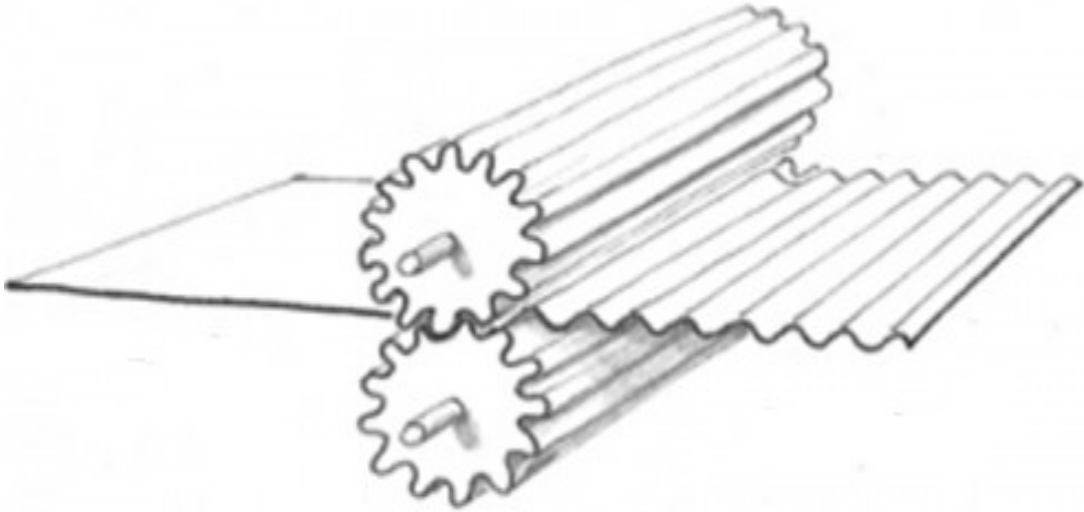
4.1 Aallotusprosessi

Ennen kuin aallotuskartonki aallotetaan aallotusteloilla, se lämmitetään esilämmityssylinterillä ja kostutetaan höyryllä. Aallotuskartongin lämmitys ja kostutus helpottavat aallotusta. Lämmityksellä ja kostutuksella alennetaan aallotuskartongin plastisoitumislämpötilaa. Eli lämpötilaa, jossa aallotuskartonkiin syntyy pysyviä muodonmuutoksia. Aallotuskartonki sisältää ligniiniä ja hemiselluloosia, jotka lämmitessään pehmenevät. Tällöin kuiturakenne pehmenee, aallotuskartonki taipuu helpommin aallotusteloilla ja muodostaa aaltoja. [1, 3] Optimi kosteus aallotuskartongille on 6-9 %, kun se saapuu aallottajalle [3, 48] Tärkeää on, että kosteus radassa on koko ajan tasainen. Ei kuivia tai märkiä kohtia. Tällöin aallotustulos on tasalaatuinen ja aallotuskartongin ajettavuus hyvä. [1] Kuvassa 20 on esitetty aaltopahvikoneen kaavio. 1 Pintalainerin aukirullauspukki, 2 lainerin esilämmitin, 3 aallotuskartongin aukirullauspukki, 4 aallotuskartongin esilämmitin, 5 aallottaja ja liimausyksikkö, 6 ylösvetokuljetin, 7 silta, mihin yksipuolinen aaltopahvi kerätään, 8 toisen pintalainerin esilämmitin, 9 toinen liimausyksikkö, 10 arina, 11 pituusleikkuri, 12 poikkileikkuri ja 13 valmiiden aaltopahviarkkien vastaanottolaitteet.



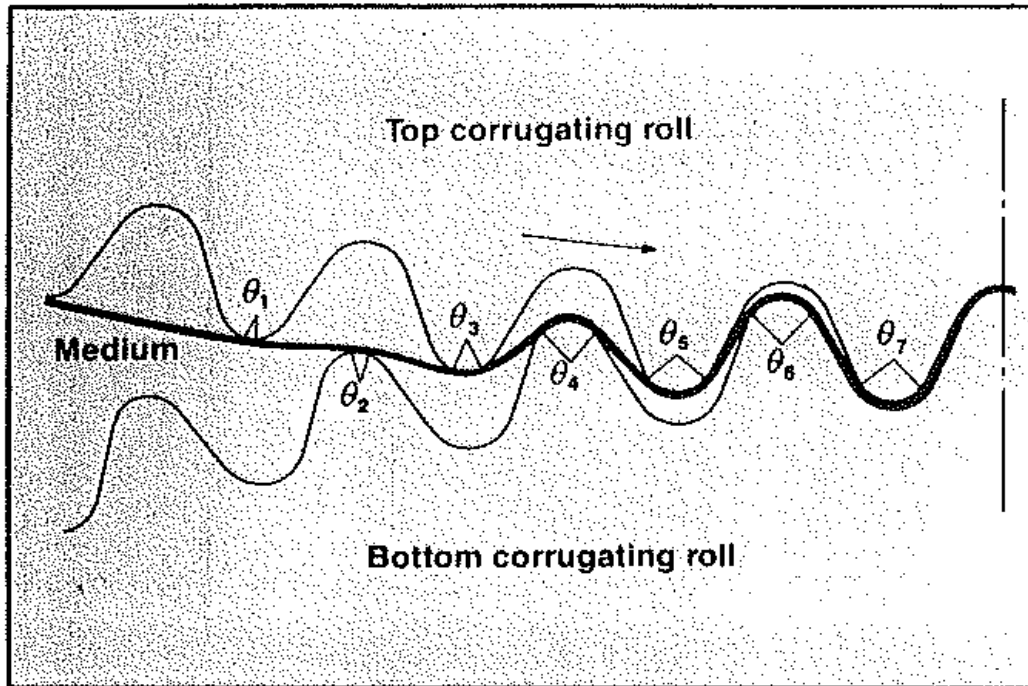
Kuva 20. Aallotuskartongin aallotus [1]

Esilämmitetty ja kostutettu aallotuskartonki syötetään aallotustelojen väliin. Telojen välistä nippiä kutsutaan labyrintiksi. Aallotus telojen lämpötila on 160-190 °C. [3] Kuvassa 21 on piirros aallotusteloista.



Kuva 21. Aallotustelat [49]

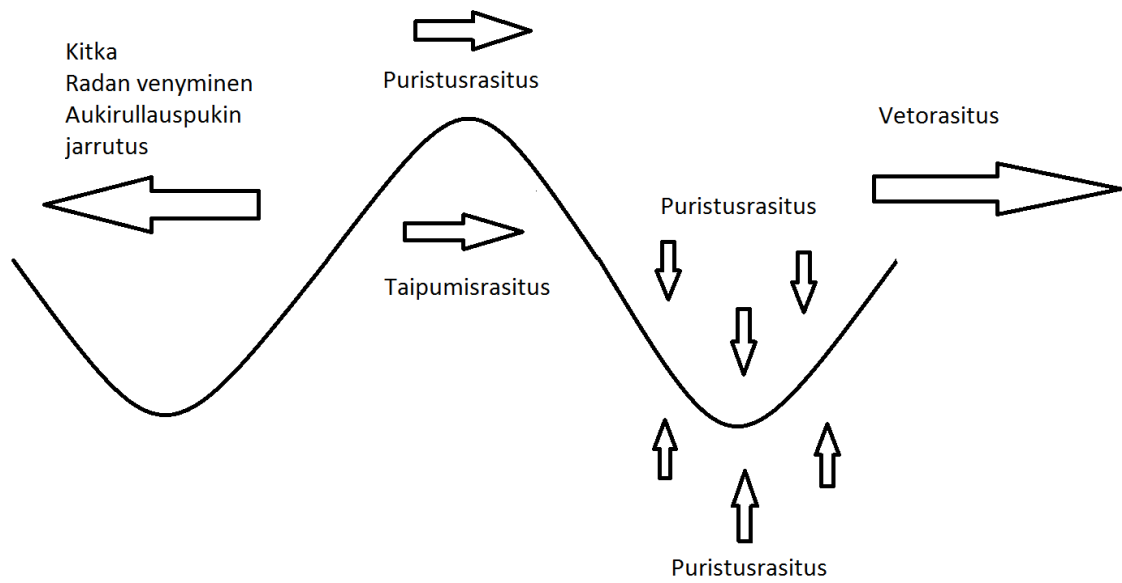
Aallotuskartonki kohtaa erittäin suuren ja monimutkaisen yhdistelmän rasituksia, kun se kulkee aallotustelojen nipin läpi [48]. Kartonki osittain liukuu, osin vedetään nippiin. Osa vetorasituksesta johtuu aallotuskartongin auki rullauksesta johtuvasta jarrutuksesta, osa aallotuskartongin taipumisesta aallon harjojen yli ja osa syynä on aallotuskartongin kitka. Kitka kasvattaa aallotuskartongin jäykkyyttä ja radan jännitystä, kun aallotuskartonki yrittää liukua aallonharjojen yli labyrintin keskellä. [1, 5, 48, 50, 51] Vetorasitus kasvaa, mitä lähemmäs nippiä aallotuskartonki joutuu. Jos vetorasitus on suurempi kuin aallotuskartongin vetolujuus, se murtuu. [1, 5, 48, 50, 51] Nipin keskellä kitka on suurimmillaan. Aallotuskartonki ei pääse liukumaan aallonharjojen yli vaan rata taipuu aalto muotoon mukaillen aallotustelojen muotoa. [5, 48, 50] Kuvassa 22 on poikkileikkaus labyrintin geometriasta. Kuvassa on esitetty kuinka aallotuskartongin kietoutumiskulma kasvaa lähestyttäessä nipin keskikohtaa. Kietoutumiskulma on kulma, johon aallotuskartongin täytyy taipua kulkiessaan aallotustelojen läpi. Kietoutumiskulma kasvaa, mitä lähemmäs nipin ydintä aallotuskartonki etenee. Kulmassa 01 aallotuskartonki juuri ja juuri taipuu ja liukuu helposti aallonharjojen yli, mutta kulma 07 on jo nipin keskellä ja aallotuskartonki mukailee aallotusteloja taipuen täysin niiden mukaisesti. Useinaaltojen murtuminen ei tapahdu aallotustelojen nipin keskellä vaan juuri ennen sitä. Suunnilleen taivutuskulma 04 kohdalla [48].



Kuva 22. poikkileikkaus aallotustelojen nipin labyrinthin geometriasta. [48]

Aallotuskartongin taipuessa aallonharjan yli muodostuu taivutusrasitus aallon kuperalle puolelle ja puristusrasitus koveralle puolelle. Osa rasituksesta johtuu aallotuskartongin venymisestä aallonharjojen yli, sillä kitka estää aallotuskartongin liukumisen. Jos aallonharjan muodostama taivutus- ja puristusrasitus ovat suurempia kuin aallotuskartongin konesuuntainen venyvyys, aiheuttaa se kuitujen sidosten repeytymistä. [51] Nipin keskellä aallotuskartonkiin kohdistuu suuria poikittaissuuntaisia rasituksia, jotka puristavat rataa kasaan ja pienentävät aallotuskartongin paksuutta noin 30% - 35%. Poikittaissuuntaisten voimien tarkoitus on muokata aallotuskartongista aallon muotoinen. [48, 51] Radan puristus- ja taivutusrasitus aiheuttavat yhdessä painetta aallon kylkiin. [1]

Kuvassa 23 on esitetty aallotuskartongin aallotustelojen nipissä kohtaamat voimat ja rasitukset. Rataa eteenpäin vievä voima on veto. Takaisin päin vetävien voimien kitkan ja aukirullauspukin jarrutusvoiman täytyy olla vetoa ja radan venymistä pienemmät, jottei rata katkea. Aallon harjoissa esiintyy taipumista, puristumista ja venymistä, kun aallotuskartonki muotoutuu aallonharjojen yli. [52]



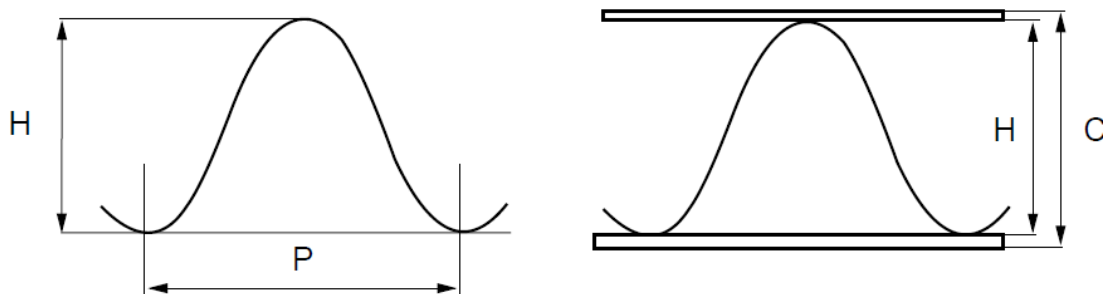
Kuva 23. Aallotuskartongin kokemat rasitukset aallotustelojen nipissä.

Aallotuksessa aallotuskartonki kärsii puristuksessa ja vedossa pysyviä muodonmuutoksia ja saavuttaa pysyvän aaltomuodon lähtiessään labyrintista. Aaltopahvin laatu määräytyy aallotuskartongin aallottamisvaiheessa. Aallotuksen aikana aallotuskartongin mahdollinen potentiaali tulee esiin. Toisaalta myös materiaalien viat tulevat parhaiten esiin aallotuksen aikana. [52] Aallotuksessa syntyviä ongelmia ovat aallotuskartongin radan murtuminen, vinot aallot, pinnan kupruilu, aaltopahvin käyristyminen, aaltojen murtuminen, highlow-viat eli erikorkuiset aallot sekä lainerien huono liimautuvuus. [5, 50, 51] Myös epätasainen kosteus tai neliömassa vaihtelut aallotuskartongissa tuottavat haasteita radan aallotukselle. [48, 50] Aallotuksen ja aaltopahvin valmistuksen haaste on, ettei ole yhtä tai edes viittä mallia, jotka selittäisivät tyhjentävästi aallotuskartongin, aallon muodon, lainereiden ja aaltopahvikoneen olosuhteiden yhteisvaikutuksen. Tämän kaltainen malli olisi liian suuritöinen ja epävarma. Ei ole mahdollista suorittaa niin monia testejä aallotuskartonki-, laineri- ja aaltopahvikoneella, jotta saataisiin riittäviä ajo- ja laatu-korrelaatioita. [48]

5 AALTOPROFIILI

5.1 Mistä profiili koostuu

Aaltoprofiilia luonnehtivat sen aallon pituus, korkeus, aaltojen lukumäärä yhdessä metrissä aaltopahvia ja aallotuskerroin, joka kuvaa kuinka monta metriä aallotuskartonkia kuluu yhteen aaltopahvi metriin. Nämä suureet muodostavat aallon profiilin. Aaltoprofiili kertoo aallotuskartongin muodon aaltopahvissa. Aaltoprofiilien muodot ovat usein lähellä siniaaltoja. [1, 53] Kuvassa 24 on esitetty aaltoprofiilin ominaisuudet. H on aallon korkeus, P on aallon pituus ja C aaltopahvin paksuus.



Kuva 24. Aaltoprofiilin ominaisuudet [3]

Aaltoprofiili määrittää aallotuskartongin muodostamien aaltojen koon ja muodon. Eli aaltopahvin paksuus johtuu aaltoprofiilista. Määrävä tekijä on aallon korkeus. Aallon muotoon vaikuttavat aallon harjan säde, aallon harjan kulma sekä aallon kylkien kulma. Ne vaikuttavat aallon lujuuteen enemmän kuin aaltopahvin paksuuteen. [1]

5.2 Eri aaltoprofiileja ja niiden ominaisuuksia

Aaltoprofiileja on paljon erilaisia. Alan yrityksillä on jopa omat aaltoprofiilinsa tuotteesta riippuen ja profiileilla omat nimet. Yleisimmät aaltoprofiilit ovat A-aalto, B-aalto, C-aalto, E-aalto ja F-aalto. Vaikka profiileilla on suurin piirtein samat mitat, eivät ne vastaa täysin toisiaan. [1] Taulukossa 2 on esitetty yleisimmät aaltoprofiilit.

Taulukko 2. Tavallisimmat aaltoprofiilit. [3]

Aaltoprofiili	Aaltojen määrä / metri	Aallon korkeus	Aallotuskerroin
A	100	4 - < 5 mm	1.50
C	130	3 - < 4 mm	1.45
B	150	2 - < 3 mm	1.36
E	300	1 - < 2 mm	1.24

Erilaisia aaltoprofiileja käytetään erilaisiin tuotteisiin. Eri profiileilla saadaan aaltopahville erilaisia ominaisuuksia. Aaltoprofiili valitaan sen mukaan, mikä ominaisuus on suojattavalle tuotteelle tärkeä. [54]

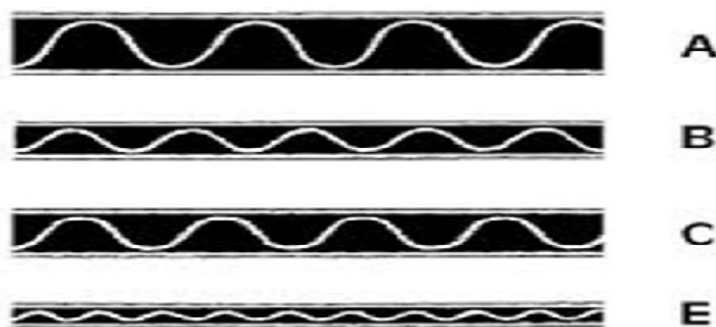
Isoilla aalloilla on suuri aallonkorkeus. Eli isoilla aalloilla aaltopahviin saadaan suuri paksuus, mistä johtuu suuri taivutusjäykkyys. Puristuslujuus ja pinoamislujuus ovat myös hyvät isoilla aaltoprofiileilla. Isot aallot muodostavat loistavat mekaaniset ominaisuudet, mutta aaltopahvin painatusominaisuudet kärsivät suuresta ja karkeasta aaltomuodosta. Iso aalto ja toisistaan kaukana olevat aallon harjat saavat aikaan lainerin painopinnassa aaltomaisuutta. [55] Kuvassa 25 isojen aaltojen aiheuttamaa aaltomaisuutta lainerissa.



Kuva 25. Isojen aaltojen aiheuttama aaltomaisuutta lainerissa [55]

Stanssaukseen isot ja karkeat aallot tuovat murtuma-alttiutta. Logistiikan kannalta ajateltuna isot aallot eivät ole hyviä, sillä niistä muodostunut paksu aaltopahvi vie varastoituna paljon tilaa, mikä aiheuttaa logistisia ongelmia. [1] Aaltoa, joka on melkein A-aalto, käytetään standardina aallotuskartongin ja aaltopahvin lujuusmittauksissa [31].

C- ja B-aalto ovat keskikokoisia aaltoja. C-aalto on hiukan isompi kuin B-aalto. C-aalto on jäykkä ja tuo hyvän pinoamislujuuden. Se on eniten käytetty aalto muoto ja tavallisin aaltoprofiili aaltopahvilaatikoissa. Myös B-aallon pinottavuus on suhteellisen hyvä. Koska B-aalto on pienempi, sillä on paremmat painamis- ja stanssausominaisuudet. [1] B-aallon suuri suosio aaltopahvilaatikoissa johtuu siitä, että se on niin pieni, että painatus- ja stanssausominaisuudet ovat hyvät, mutta lujuusominaisuudetkaan eivät kärsi liikaa [54]. Pienempi aalto tuo ohuemman aaltopahvin ja näin ollen pienemmät aallot vievät vähemmän tilaa varastoinnissa. [1] Kuvassa 25 poikkileikkaus eri aaltoprofiilien aalloista.



Kuva 26. Eri aaltoprofiileja. [4]

Pienten aaltojen lujuusominaisuudet ovat paljon heikommat kuin isojen aaltojen. Pieniä aaltoprofiileja ei kannata käyttää kuljetuspakkauksiin, sillä ohuen aaltopahvin luoman heikon taivutusjäykkyyden takia pinoamislujuus on huono. Pieni-aaltoisesta aaltopahvista tulee kuitenkin loistavia primääripakkauksia, eli kuluttajapakkauksia. [56] Primääripakkausten tulee olla edustavan näköisiä, painojäljen ja stanssauksen onnistuneita. Pieniaaltoisista E- ja F-aallon aaltopahveista tulee edustavia paketteja ja laminoitavia tuotteita. F-aaltoa voidaan jopa jatkojalostaa taivekartonkikoneella. [1] On kehitetty myös huippu pieniaaltoisia profiileja, mikroaaltoja. G-, N- ja O-aallot ovat niin pieniä, että ne eivät enää tuo aaltopahville sille ominaisia suojaus- ja pinoamisominaisuuksia. Ne voidaan käyttötarkoituksen puolesta luokitella vahvoiksi taivekartongeiksi. Huippupienillä aalloilla saadaan aikaiseksi loistavat painatusominaisuudet. [1, 56]

5.3 Kevyemmät kartongit ja pienemmät aallot

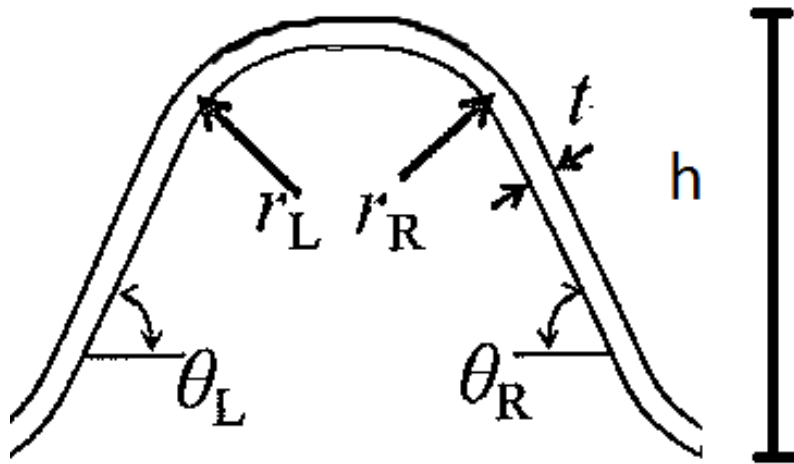
Aaltopahviteollisuus siirtyy koko ajan kevyempiin kartonkilaatuihin ja pienempiin aaltoprofiileihin [54, 56]. Muutokseen on monia syitä. Yksi muutoksista on siirtyminen yksittäispakkaamaan pieniä ja kevyitä tuotteita. Pakettien täytyy olla ulkonäöllisesti edustavia ja houkuttelevia kaupan hyllyllä. Luksustuotteitten kuten meikkien, kosmetiikan, lelujen, pelien ja lääkkeiden pakkausten tahdotaan erottuvan ja myyvän sisältämäänsä tuotetta. [56]

Toinen suuri muutos markkinoilla on siirtyminen pakkausten ominaisuuksien ostamiseen painon sijaan. Tuotteille saadaan lisää arvoa, näyttävillä ja kestäville pakkauksilla. Näin myös aaltopahvipakkausten arvo kasvaa. Tulevaisuudessa ei kartonkia myydä sen painoa vastaan vaan hinta maksetaan kartongin sisältämistä ominaisuuksista. [56] Aiemmin pienet kotelot ja paketit tehtiin taivekartongista, mutta pienten mikroaaltojen myötä aaltopahvista saadaan tehtyä kevyttä, ohutta ja lujuusominaisuuksiltaan kilpailukykyistä. Siinä on loistavat paino- ja stanssausominaisuudet. [54, 56] Myös laminointi ja pigmenttipäällystys toimivat hyvin pienillä aaltoprofiileilla. Graafinen laatu ja lujuus ovat yhtä hyviä tai parempia kuin taivekartongilla. Paino – lujuus suhteella ohuet aaltopahvit kilpailevat jopa muovin kanssa. Luoden näin ekologisemman vaihtoehdon [56]

Siirtymistä pieniin aaltomuotoihin tukevat kehittyneet tekniikka ja kartonginvalmistusprosessit. Kevyillä kartongeilla on tänä päivänä yhä paremmat lujuusominaisuudet. Enää ei tarvitse tehdä kartongista paksua ja painavaa, jotta se olisi luja. Korkeammat lujuusominaisuudet ja kehittynyt pakkausten suunnittelu luovat uusia mahdollisuuksia. Aaltopahvipakkausten laadun lisäksi kuljetus- ja varastointikustannukset ovat iso syy muuttuneeseen trendiin. Mitä pienempi aaltoprofiili sitä ohuempi aaltopahvi ja sitä pienempään tilaan aaltopahvit saadaan mahtumaan. Koko toimitusketjun tehokkuus paranee, kun siirrytään ohuempiin aaltopahveihin. Kolmas tärkeä syy pieniin aaltomuotoihin siirtymiseen ovat ympäristö ja hiilijalanjäljen pienentäminen. [54, 56]

5.4 Aaltoprofiilin vaikutus aaltopahvin lujuuteen

Aallotustapahtumaan ja sen onnistumiseen sekä aaltokerroksen antamaan lujuuteen aaltopahvissa on pyritty vaikuttamaan muotoilemalla aaltoa. Perinteinen aalto muistuttaa sinimuotoista aaltoa. Aallon muoto on aina kompromissi. Sillä on vaikutusta ajettavuuteen, aaltopahvin lujuuteen, liimasauman lujuuteen, aallotuskartongin kulutukseen, telojen kulutuskestävyyteen, telojen melutasoon, telojen värähtelyn maksimikohtien sijaintiin ja värähtelyn voimakkuuteen, aaltopahvin ulkonäköön, telojen valmistuskustannuksiin ja aaltopahvin sekä laatikon lujuuksiin. [1] Aallon muodon määrittävät aallon korkeus, kyljen kaltevuus, aallonharjan säde sekä aallon symmetrisyys. Symmetrisyydellä tarkoitetaan sitä, ovatko aallon harja ja juuri symmetriset muodoltaan ja ovatko aallon molemmat kyljet yhtä kaltevia. [57, 58] Kuvassa 27 on esitetty aaltoprofiili. Aaltoprofiiliin merkitty h on aallonkorkeus, t on aallotuskartongin paksuus, r_L on aallonharjan vasemman puolen säde, r_R on aallonharjan oikeanpuolen säde, θ_L on aallon vasemman kyljen kaltevuus ja θ_R on aallon oikean kyljen kaltevuus.

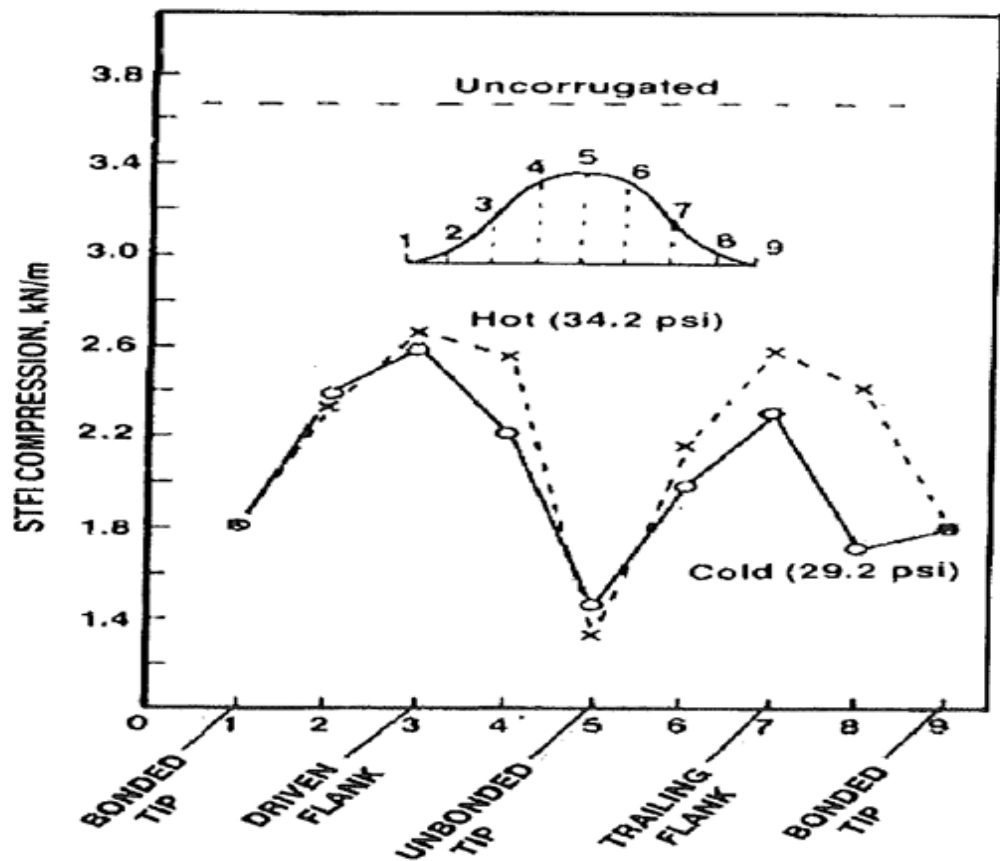


Kuva 27. Aaltoprofiili [58]

Aallon muotoilussa aallon korkeus ja aallonharjan kaarevuussäde vaikuttavat paljon aallon muodostumiseen. Aalto voidaan tehdä laakeaksi, jolloin vähennetään aallotuskartongin litistymistä. Samalla voidaan pienentää aallon takapinnalla näkyvien raitojen voimakkuutta. [1] Toisaalta, kun aallon harjaa kasvatetaan, kasvaa kitkavoima aallotuksen aikana. Tällöin murtumat lisääntyvät aaltojen kyljissä. [39] Kun aallonharjaa kavennetaan, saadaan aallotuskartongin kulutusta vähennet-

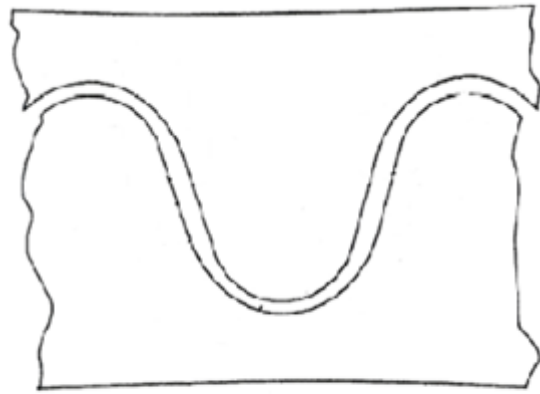
tyä, koska aallotuskerroin pienenee. [1] Tällöin taas aallonharjan säde pienenee ja taivutus aallotuskartongilla kasvaa sekä murtumat lisääntyvät aaltojen harjoilla. [39]

Aallotuksen aikana eri osat aallon profiilissa kokevat eriasteisia lujuuden mene-
tyksiä. Yleisesti aallotuskartongin puristusvoimankestämiskyky heikkenee ja kar-
tongin paksuudesta häviää noin 15-25% aallotuksen aikana. Aalto voidaan jakaa
aallonharjoihin ja kylkiin. Tutkimusten mukaan aallonharja menettää huomatta-
vasti enemmän puristusvoimaa kuin kylki. [59] Kuvassa 28 on esitetty aallon eri
osille tehtyjen SCT-mittausten tulos aallotuksen jälkeen.



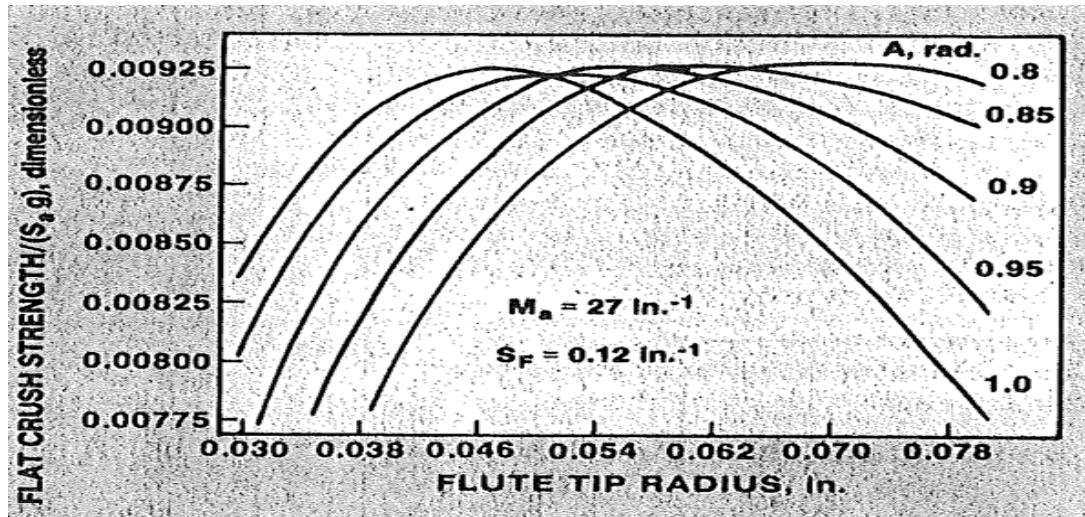
Kuva 28. Aallotetun aallotuskartongin eri aallon osille tehtyjen SCT-mittausten tulokset kuvajassa [51]

Kuvavaajassa on esitetty aallot-tamattoman aallotuskartongin puristuslujuus ja aallotetun eri osien lujuudet. Kohdassa 1 on liimattu aallonharja, kohdassa 3 aallon kylki, kohdassa 5 ei liimattu aallonharja, kohdassa 7 aallon kylki ja kohdassa 9 liimattu aallonharja. Kuvassa näkyy, että aallonharjoilla SCT-mittauksen tulos on heikoin. Korkeimmat SCT-tulokset ovat aaltojen kyljissä. Tämä käy järkeen, sillä aaltojen harjojen kohdalla aallotuskartonki kokee suurimman taipumisen ja puristusrasituksen aallotuksen aikana. [51] Aallotuskartongin puristumiseen aallotusteloilla vaikuttaa myös aallotustelosten välys, eli kahden metallipinnan väli. Aallotusteloilla välys on kokoajan likimain sama. Vain aallon kylkien ei tahdota puristuvan liian voimakkaasti. Siksi niiden kohdalla välys on hiukan suurempi kuin aallon harjoilla. [1]



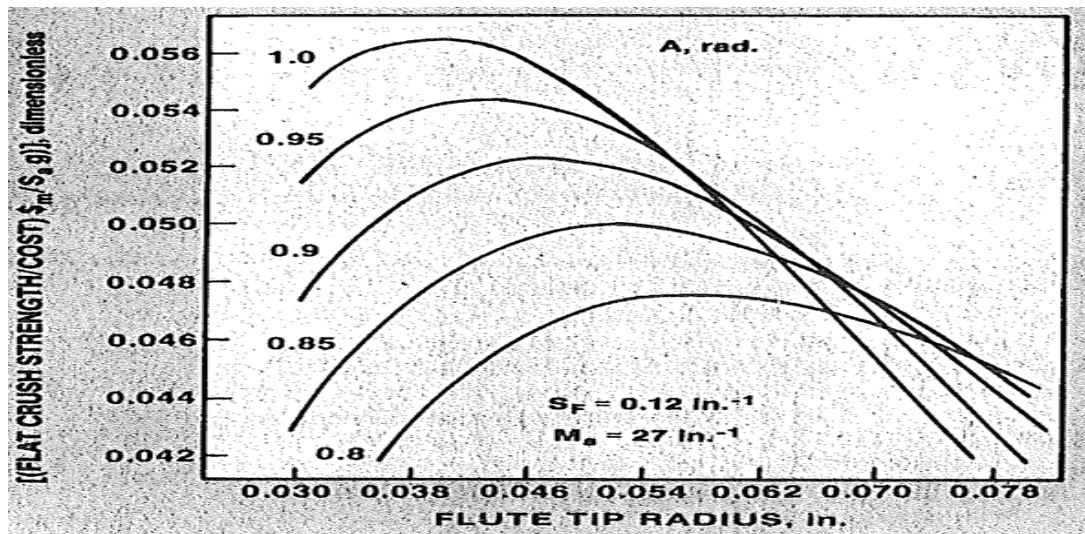
Kuva 29. Aallotustelosten välys on suurempi kylkien kohdalla [60]

Aaltoprofiililla ja aallon muodolla on suuri merkitys litistyslujuudelle (FCT). Litistyslujuudessa yksi tärkeimmistä tekijöistä aallon muodossa ovat aallon kylkien pituus ja kaltevuus. Aalto voidaan jakaa litistyslujuusmittauksessa kahteen eri vaikuttavaan osaan: aallonharjoihin, jotka ovat liimattuja kiinni lainereihin sekä kylkiin, jotka ovat vapaat liimasta. Kyljissä niiden pituus ja kaltevuuskulma ovat tärkeitä. Aallon profiilin vaikutusta FCT:n on tutkittu kuvassa 30. Kuvaajassa FCT riippuu aallon harjan säteestä ja aallon kyljen kaltevuudesta. Vasemman puolen asteikolla on FCT, mittayksiköittä, oikean puoleisella asteikolla on aallon kyljen kaltevuus radiaaneina ja alhaalla aallonharjan säde tuumina. Tutkituissa aalloissa aallon korkeus oli 3,2 mm. [61]



Kuva 30. FCT aallonharjan säteen ja aallon kyljen kaltevuuden funktiona. [61]

Kuvaajan perusteella suuremmalla aallon kyljen kaltevuudella saavutetaan korkein mahdollinen FCT, kun aallon harjan säde on mahdollisimman suuri. Eli kun aalto on mahdollisimman laakea. Pieni kyljen kaltevuus taas vaatii melko terävän aallonharjan saavuttaakseen yhtä korkean FCT:n. Tutkimuksessa pohdittiin lisäksi materiaalikulujen vaikutusta aallon muodon valinnassa. Kuvassa 31 on esitetty kuvaaja, jossa FCT/materiaalikuluilla riippuu aallonharjan säteestä ja aallon kyljen kaltevuudesta. [61]



Kuva 31. FCT/materiaalikuluilla aallonharjan säteen ja aallon kyljen kaltevuuden funktiona. [61]

Tässä tapauksessa materiaalikulujen huomioon ottaminen ohjaa aallonharjan sädetä selvästi pienemmäksi. Silti sama ilmiö on näkyvillä. Mitä suurempi on kyljen kaltevuus, sitä suurempi tulee aallonharjan säteenkin olla, jotta saavutetaan korkea FCT. Kuitenkin korkeimmat FCT/materiaalikuluilla arvot saavutetaan pienimmillä aallonharjan säteillä ja mahdollisimman pystysuoralla aallon kyljellä. [61]

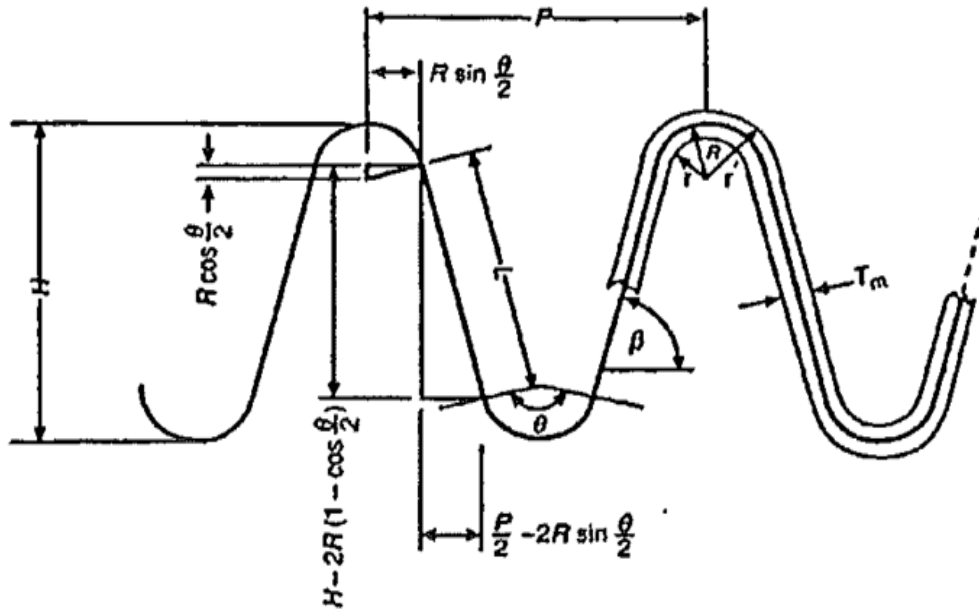
Eri aaltoprofiileilla saavutetaan erilaisia lujuusominaisuuksia. Suuret aallot A-aallon tavoin tuovat aaltopahviin suuren taivutusjäykkyyden, koska siinä saavutetaan suuri paksuus aaltopahvilla. Myös puhkaisulujuus on hyvä A-aallolla. Pienet aallot kuten B-aalto tuo aaltopahvilaatikkoon tehokkaan suojan puristusta ja dynaamisia liikkeitä vastaan. Poikkisuunnassa sen taivutusjäykkyys on hyvä, mutta aaltojen suunnassa ei niinkään. Tämä johtuu sen huomattavasti pienemmästä paksuudesta kuin A-aallolla. [62] Taulukossa 3 on esitetty tavallisimpien aaltopahvi profiilien A-, B- ja C-profiilin ominaisuuksia eri neliömassoilla.

Taulukko 3. A-, B- ja C-profiilin ominaisuuksia eri neliömassoilla [57]

Aalto	Neliömas- sa g/m ²	Paksuus mm	Taivutusjäykkyys ks Nm	Taivutusjäykkyys ps Nm	ECT kN/m
A	366	5,13	21,24	9,08	7,29
	410	5,23	22,71	9,72	7,92
	674	5,54	28,81	15,93	10,53
C	366	4,14	12,43	5,54	7,43
	410	4,06	14,91	6,09	7,72
	674	4,52	20,56	10,06	11,03
B	366	3,02	6,15	3,13	7,60
	410	3,15	7,93	3,30	8,27
	674	3,63	12,88	6,27	11,42

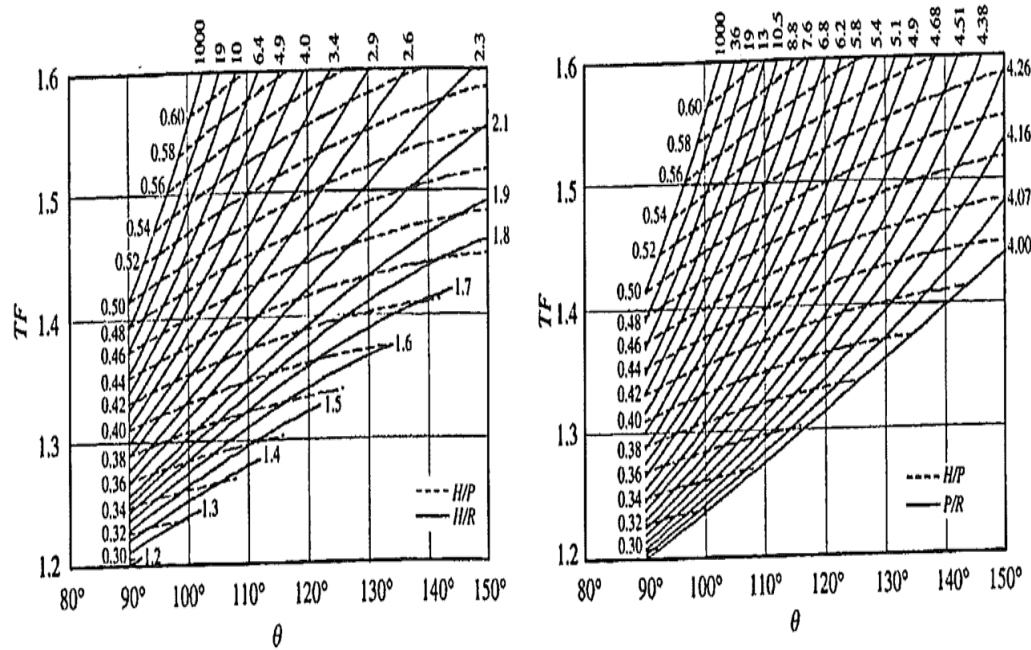
Taulukossa on aaltopahvin aaltomuoto, paksuus, taivutusjäykkyys kone- ja poikki-suuntaan sekä ECT eri neliömassoilla. Taulukosta näkyy, että A-aallolla on selvästi suurin paksuus jokaisella neliömassalla ja B-aallolla pienin. Konesuuntaisessa ja poikkisuuntaisessa taivutusjäykkyydessä A-aallolla on selvästi korkeimmat arvot, mikä johtuu korkeasta paksuudesta. Kuitenkin ECT-arvoissa B-aallon arvo on hiukan korkeampi kuin A- ja C-aallolla. ECT on riippuvainen aaltopahvin poikkisuuntaisista puristuslujuusarvoista ja selvästi myös aaltoprofiililla on merkitystä. Osa syynä voi olla, että B-aallolla on liimasaumoja tiheimmin antamassa tukea kuin A- tai C-aallolla [28].

Erilaisia aaltoprofiileja ja aallon geometriaa muuttamalla voidaan vaikuttaa aaltopahvin lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin. Urbanik on luonut mallin optimaallisen aallon muodon ja aallon koon löytämiseen. Mallin perusgeometria koostuu aallon kaari-osista ja suorista viivoista kylkinä. Kuvassa 32 on aallon perusgeometria esiteltynä. P on aallon kyljen kaltevuus, H on aallon korkeus, T on aallotuskartongin paksuus, θ on aallon harjan taivutuskulma ja R aallon harjan säde. R on jaettu r , joka on aallon harjan säde ja r' , joka on aallon juuren säde. [57]



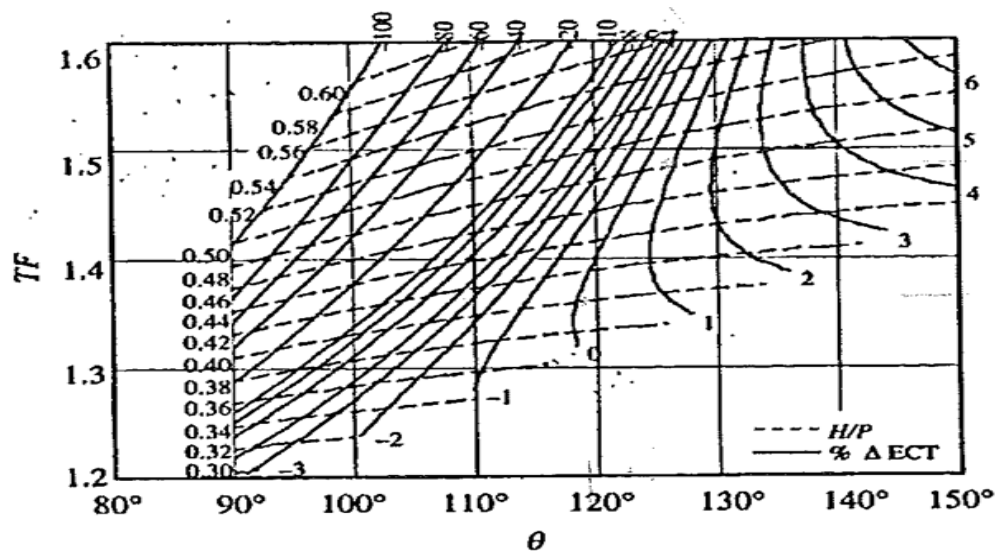
Kuva 32. Urbanikin mallin aallon perusgeometria. [57]

Aallon perusgeometrian avulla Urbanik on laskenut merkit TF , joka on aallotuskerroin ja θ on aallon harjan taivutuskulma sekä vakiot H/P , P/R . Näitä apuna käyttäen on luotu kuvaajat kuvassa 33. Niistä voi ennustaa aallotuskertoimen (TF) ja aallon harjan taivutuskulman (θ) jos tietää aallon korkeuden, kyljen kaltevuuden ja aallonharjan säteen. [57]



Kuva 33 Vasemmassa kuvaajassa pystykäyrä H/R ja vaakakäyrä H/P vastaavat aallotuskerrointa TF ja aallonharjan taivutuskulmaa θ . Oikeassa kuvaajassa pystykäyrä H/R ja vaakakäyrä P/R vastaavat aallotuskerrointa [57]

Kuvaajien perusteella Urbanik muodosti 8 erilaista aaltomuotoa ja niille määrittä niille aaltopahvin ECT.



Kuva 34. Pystykäyrällä ECT-arvo (ilmaistu prosentuaalisena erona standardiprofilista mitattuun ECT:n) Vaakakäyrällä H/P. [57]

Mallin perusteella on helppo ennustaa, miten aaltoprofiili vaikuttaa materiaalikuuluihin, ajettavuuteen ja aaltopahvin lujuuteen. Malli ei ole täydellinen eikä täysin luotettava, sillä tarpeeksi laajoja koesarjoja on mahdoton tehdä. Se antaa kuitenkin mahdollisuuden tarkastella muutoksia aaltopahvissa. Yhdenkin komponentin muuttaminen vaikuttaa aaltopahvin ECT:n. Kuvaajista voi nähdä suuntaa antavan lopputuloksen, kun eri komponenttien yhdistelmiä kokeillaan. [57]

Aaltoprofiilit ovat muuttuneet aikojen saatossa. Nykyään aallot ovat pienempiä ja niitä on aaltopahvimetrillä enemmän. Tämä on parantanut aaltopahvin lujuutta. Käyttämällä monen aallon yhdistelmää voidaan aaltopahviin yhdistää monen profiilin hyvät puolet ja hallita materiaalikuluja tehokkaasti. Kuvassa 35 on esitetty monikerrosaaltopahvi. Monikerrosaaltopahvilla saavutetaan useamman eri aaltoprofiilin hyvät puolet samassa aaltopahvissa. Suurella aaltoprofiililla saadaan tuotteeseen puristuslujuutta sekä taivutusjäykkyyttä ja pienellä aaltoprofiililla saadaan kaunis painopinta. [62]



Kuva 35. Monikerrosaaltopahvi [4]

Riippuu aallon muodosta ja koosta, miten paksua aallotuskartonkia kannattaa käyttää erilaisilla aaltoprofiileilla. Pienillä aalloilla aallonharjan kaarevuussäde on niin pieni, että vain ohut aallotuskartonki kykenee muovautumaan aallonharjaa vastaavaksi aalloksi murtumatta ja vaurioitumatta. Paksulla aallotuskartongilla voi esiintyä näkyviäkin vaurioita. Pienillä neliömassoilla aallotuskartonki taipuu aallonharjojen yli aallotusteloilla. Suuremmalla neliömassalla aallotuskartongin paksuuskin on suurempi. Taipuessaan aallonharjan yli siinä esiintyy paljon suurempaa puristumista koveralla puolella ja taipumista kuperalla. [30] Kaikilla aaltoprofiileilla ei ole mielekasta tehdä samoja määrityksiä. Suuret aallot tuovat paksuutta ja lujuutta aaltopahville. Pienet aaltoprofiilit taas painettavuutta. Esimerkiksi E-aallolla FCT:n mittaaminen on hyvin epämääräistä. Siinä ei välttämättä esiinny

lainkaan aallolle tyypillistä litistymistä, vaan kuorma voi nousta loputtomasti. Käytännön kannalta olisikin parempi panostaa ohuilla aaltopahveilla FCT:n sijaan taivutusjäykkyyteen. [30] Pienten aaltoprofiilien yleistyttyä ja todella pienten niin sanottujen mikroaaltojen keksimisen jälkeen on tehty myös tutkimusta muiden perinteisten aaltopahvin testien soveltuvuudesta mikroaalloille. Mikroaalloilla on eri ominaisuuksia kuin perinteisillä, suuremmilla aalloilla. Niitä käytetään eri lopputuotteissa. Miksi niiltä siis pitäisi testata samoja ominaisuuksia? G-, F- ja E-profiililla aaltopahvi on niin ohutta, että haasteita voi syntyä esimerkiksi ECT:n mittaamisessa, kun näyte nurjahtaa huomattavan helposti. [56]

6 KIRJALLISEN OSAN YHTEENVETO

Aaltopahvilaatikon puristuslujuus muodostuu aaltopahvin ominaisuuksista ja lujuuksista. Aaltopahvin lujuus taas muodostuu aallotuskartongin ja lainereiden ominaisuuksista ja lujuuksista. Laatikon puristuslujuudelle tärkein aaltopahvin ominaisuus on reunanlitislujuus ECT. Taivutusjäykkyys on toinen tärkeä tekijä. Reunanlitislujuuden, laatikon sivujen taivutusjäykkyyden ja laatikon dimensioiden perusteella lasketaan laatikon puristuslujuus BCT. Aallotuskartongin mitta-uksista CCT, CMT ja SCT ovat tärkeimmät. Lainerilla tärkeitä ovat RCT ja SCT. Reunanlitislujuus voidaan ennustaa CCT:llä, RCT:llä ja aallotuskartongin aallotuskertoimella. Litislujuus CMT:llä on suora korrelaatio aaltopahvin litistyslujuus FCT:n. Litislujuus kertoo, miten hyvin aaltopahvi ylläpitää paksuutta. Paksuuden kautta se vaikuttaa aaltopahvin taivutusjäykkyyteen ja laatikon lujuuteen. Aaltopahvilaatikon laatuun voidaan suoraan vaikuttaa vaikuttamalla sen materiaalien ominaisuuksiin. Materiaalien ominaisuuksien perusteella ennustetaan, miten luja laatikko voidaan rakentaa.

Aallotuksen aikana aallotuskartongin mahdollinen potentiaali aaltopahvissa tulee esiin. Aallotusteloilla aallotuskartonki kokee voimakkaita veto-, leikkaus- ja puristusrasituksia, jotka muokkaavat sen aaltomuotoon. Aallotustapahtumaan ja sen onnistumiseen sekä aaltokerroksen antamaan lujuuteen aaltopahvissa on pyritty vaikuttamaan muotoilemalla aaltoa. Eri käyttötarkoituksiin on muodostunut erilaisia aaltoprofiileja.

Aaltoprofiilin ominaisuuksia ovat aallonpituus, aallon korkeus, aallotuskerroin ja montako aaltoa mahtuu metriin aaltopahvia. Erilaisia aaltoprofiileja on erittäin paljon. Tavallisimmat profiilit ovat A-, B-, C- ja E-aalto. Eri aaltoprofiileja käytetään erilaisiin tuotteisiin. Isoilla aalloilla aaltopahviin saadaan hyvä taivutusjäykkyys. Pienemmät aallot sopivat hyvin laatikoihin, joihin tarvitaan hyvä painopinta. Riippuu aallon muodosta ja koosta, miten paksua aallotuskartonkia kannattaa käyttää erilaisilla aaltoprofiileilla. Suurilla aalloilla muodostuu paksua aaltopahvia ja kannattaa käyttää paksumpia kartonkeja. Ohut kartonki lommahtaa herkästi, kun aallon korkeus on suuri. Kun käytetään pieni profiilista aaltoa, ohut kartonki taipuu helpommin aaltomuotoon vaurioitumatta aallotuksessa. Ohuilla kartongeilla saavutetaan siis korkeimmat lujuudet käyttämällä pientä aaltoprofiilia. Kirjallisuuden perusteella voidaan sanoa, että parhaat lujuudet aaltopahviin ja aaltopahvilaatikkoon saadaan käyttämällä ohuilla kartongeilla pientä aaltoprofiilia ja paksulla kartongilla suurta aaltoprofiilia.

KOKEELLINEN OSA

Kokeellinen osa on jaettu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa tutkitaan eri aaltoprofiilien, standardin mukaisen melkein A-aallon, B-aallon ja C-aallon tuomia lujuuseroja CMT- ja CCT-mittauksissa aallotuskartonkitehtaalla. Toisessa osassa aallotuskartonkitehtaalla tehtiin tehdasmittakaavainen koeajo, missä tutkittiin tarkemmin matalalla neliömassalla eri aaltoprofiilien vaikutusta CMT- ja CCT-mittauksiin. Koeajossa tehdyt koeajorullat lähetettiin aaltopahvitehtaalle, missä niistä valmistettiin aaltopahvia. Aaltopahvista tutkittiin FCT ja ECT.

7 ERI AALTOPROFIILIEN VAIKUTUS AALLOTUSKARTONGIN CMT:N JA CCT:N PURISTUSLUJUUSARVOIHIN

7.1 Tavoitteet

Kokeellisessa osassa tavoitteena oli tutkia, miten aallotuskartongin CMT:n ja CCT:n tuloksiin vaikuttaa jos mitattavat testiliuskat aallotetaan erikokoisilla aalloilla. Aaltoprofiileina käytettiin standardin mukaista melkein A-aaltoa, B-aaltoa ja C-aaltoa. Hypoteesi oli, että pienillä neliömassoilla kuten 110 g/m^2 ja 127 g/m^2 B-aaltoa käyttämällä saadaan parempia lujuusarvoja.

Osana kokeellista osaa tutkittiin CMT0-mittauksen toimivuutta ja sen arvojen luotettavuutta. CMT0 verrattiin standardin mukaiseen CMT30. Haluttiin selvittää, miten hyvin mittaukset korreloivat ja onko CMT0-mittauksen arvoista hyötyä laadun tarkkailussa. Mahdollisuutta CMT:n välipisteen määrittämiseen tutkittiin. Haluttiin selvittää, onko välipiste mitattavissa ja mitä lisäarvoa sen tutkimisesta saataisiin. Myös laboratoriomittausten laajuuteen ja suoritustapoihin pureuduttiin aallotuskartonkitehtaalla.

7.1.1 Tutkimuskysymykset

Tutkittaessa eri aaltoprofiilien vaikutusta CMT:n ja CCT:n lujuusarvoihin, tarkoituksena oli selvittää:

- Millaisia lujuuseroja erikokoiset aallot, standardin mukainen melkein A-aalto, B-aalto ja C-aalto tuovat esiin?
- Näkyykö eri aaltoprofiileilla lujuuseroja molemmissa CMT:ssä sekä CCT:ssä kaikilla neliömassoilla?
- Reagoivatko matalat neliömassat, 110 g/m^2 ja 127 g/m^2 , eniten aaltoprofiilin muuttamiseen?
- Saavutetaanko pienillä neliömassoilla ja B-aallolla parhaat lujuudet?
- Onko CMT0-mittaus luotettava ja antaako se todenmukaisen kuvan aallotuskartonkitehtaan laadusta?
- Onko CMT:n välipisteen mittaaminen mahdollista?
- Mitä lisäarvoa CMT:n välipisteen tutkimisesta saataisiin?
- Ovatko aallotuskartonkitehtaan laboratorion suorittamat lujuusmittaukset tarpeeksi laajat ja antavatko ne todellisen kuvan laadusta?

7.2 Käytetyt materiaalit ja menetelmät

7.2.1 Mitattavat näytteet

Aallotuskartonkitehtaalla otettiin normaalista ajotilanteesta kaikista eri ajettavista neliömassoista poikkiratanäytteet kiinnirullaimelta mitattavaksi laboratorioon. Näytteitä otettiin aikana 8.9 – 29.9. Tarkoituksena oli ottaa näytteet kaikista neliömassoista, jotta voitaisiin tutkia reagoivatko kaikki neliömassat aaltoprofiilin muuttumiseen ja onko jokin neliömassa herkempi eri aaltoprofiileille. Eri tehtaalla ajettavat neliömassat on lueteltu taulukossa 4.

Taulukko 4. Aallotuskartonkitehtaalla ajettavat neliömassat.

Neliömassa g/m ²
110
127
140
150
160
175
200

Tärkeimpinä neliömassoina pidettiin 110 g/m², 140 g/m² ja 160 g/m². Eniten tehtaalla valmistetaan 140 g/m² ja 160 g/m² aallotuskartonkia. Kuitenkin mielenkiintoisin neliömassa oli 110 g/m², sillä sen uskottiin reagoivan eniten aaltoprofiilin muuttamiseen. Näistä kolmesta neliömassasta otettiin poikkiratanäytteet kahdelta eri päivältä, jotta tilastollista luotettavuutta olisi enemmän. Muista neliömassoista näytteet otettiin vain yhtenä päivänä.

7.2.2 Mittaukset

Poikkiratanäytteistä leikattiin $40 \times 40 \text{ cm}^2$ arkkeja koko koneen leveydeltä (6 arkkia, poikkiratapakoista 1, 3, 6, 9, 12 ja 14). Poikkiratapakkojen määrällä ja valinnoilla on pyritty saamaan koko kartonkikoneen rata edustetuksi. Arkeista määritettiin laboratorioissa CMT0, CMT30, CCT15 ja CCT30 RH50:ssä sekä CMT30 ja CCT30 RH90:ssä. Mittauksissa käytetyt standardit ovat liitteessä 1.

CMT30:stä kokeiltiin määrittää lisäksi käyrän välipistettä. Lorenzen & Wettren Crush Testeristä luettiin puristustapahtuman aikana näytöllä hetkeksi pysähtyvä puristuslukema (N). Toisaalta kokeiltiin vaihtaa Crush Testerin asetuksia niin herkiksi, että laite lopettaa näyteliuksen puristamisen, kun puristuminen hidastuu välipisteen kohdalla.

7.3 Tulosten esitystapa ja luotettavuuden arviointi

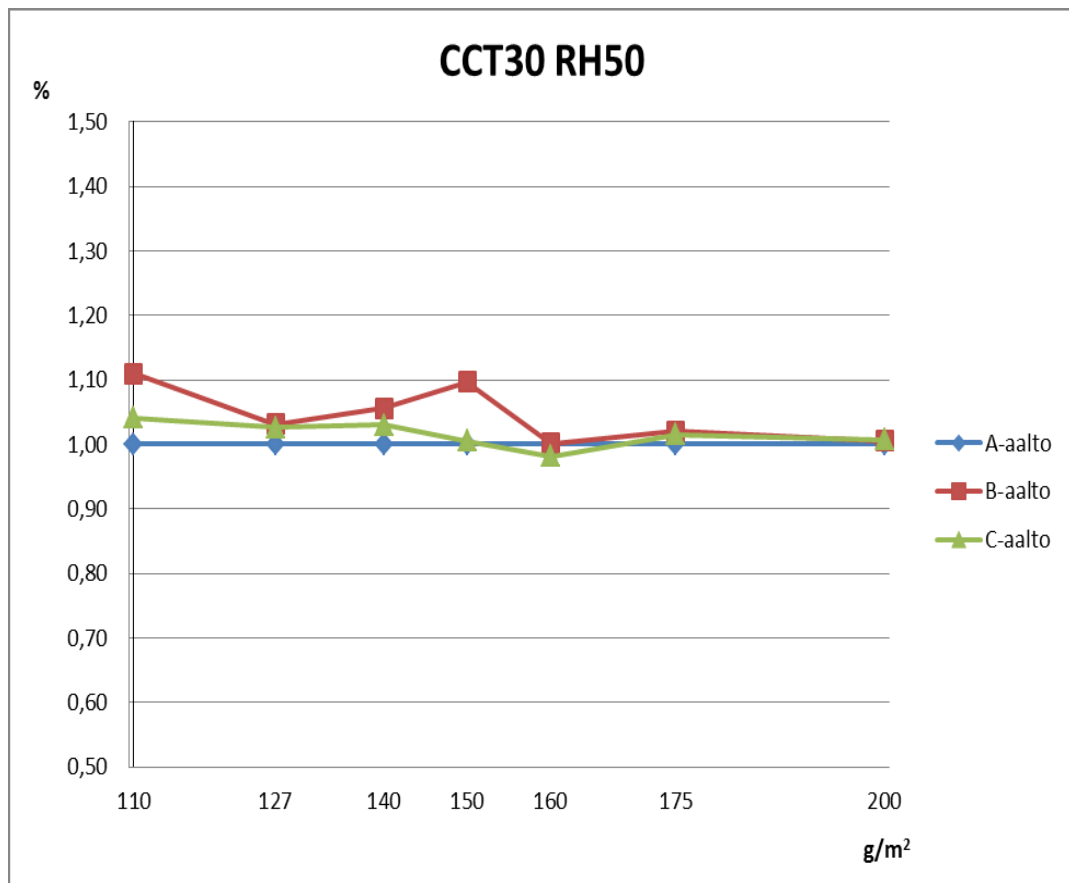
CMT- ja CCT-kuvaajissa kaikki arvot on jaettu A-aallon keskiarvolla, jotta nähdään heti prosentteina, miten B- ja C-aallon arvot reagoivat prosentteina A-aallon arvoihin verrattuina. Kuvaajissa on käytetty 95 % luottamusväliä.

Tulosten luotettavuuteen on vaikuttanut monia seikkoja. Suuri tekijä on, että mittauksia on tehty suurimmalla osaa neliömassoista vain yhtenä päivänä ja 110 g/m^2 , 140 g/m^2 ja 160 g/m^2 kahtena päivänä. Tästä johtuen virheitä ja epäluotettavuutta voi aiheutua tehtaan prosessin vaihtelusta. massanvalmistuksessa käytetty hake ei aina ole homogeenista, massanvalmistuksessa ja massanpesuissa prosessiolosuhteet voivat vaihdella sekä kartonkikoneen ajo-olosuhteet eivät ole aina samat. Virheitä mittauksiin voi syntyä myös mittaustapahtuman aikana. Vain yksi ihminen on valmistellut näytteet ja tehnyt mittaukset. Eli yksilöistä johtuva virhe voidaan eliminoida. Näytteitä on mitattu standardin mukainen 10 näytettä mitta-pistettä kohti, mutta suurempi otanta toisi paremman tilastollisen luotettavuuden. Virheitä mittauksissa on voinut syntyä näytteiden valmistelussa. Varsinkin CMT-näytekammat B- ja C-aallolla luultavasti aiheuttivat virheitä. Liitteessä 2. kuvat erilaisista näytteenvalmistelukammoista. Mittaamisessa syntyy myös osa virheestä. RH90 näytteiden tuloksien luotettavuus kärsii, kun kosteus häviää mitatessa yhden mittapisteen rinnakkaismäärittämiä, mikä lisää epäluotettavuutta.

7.4 Tulokset

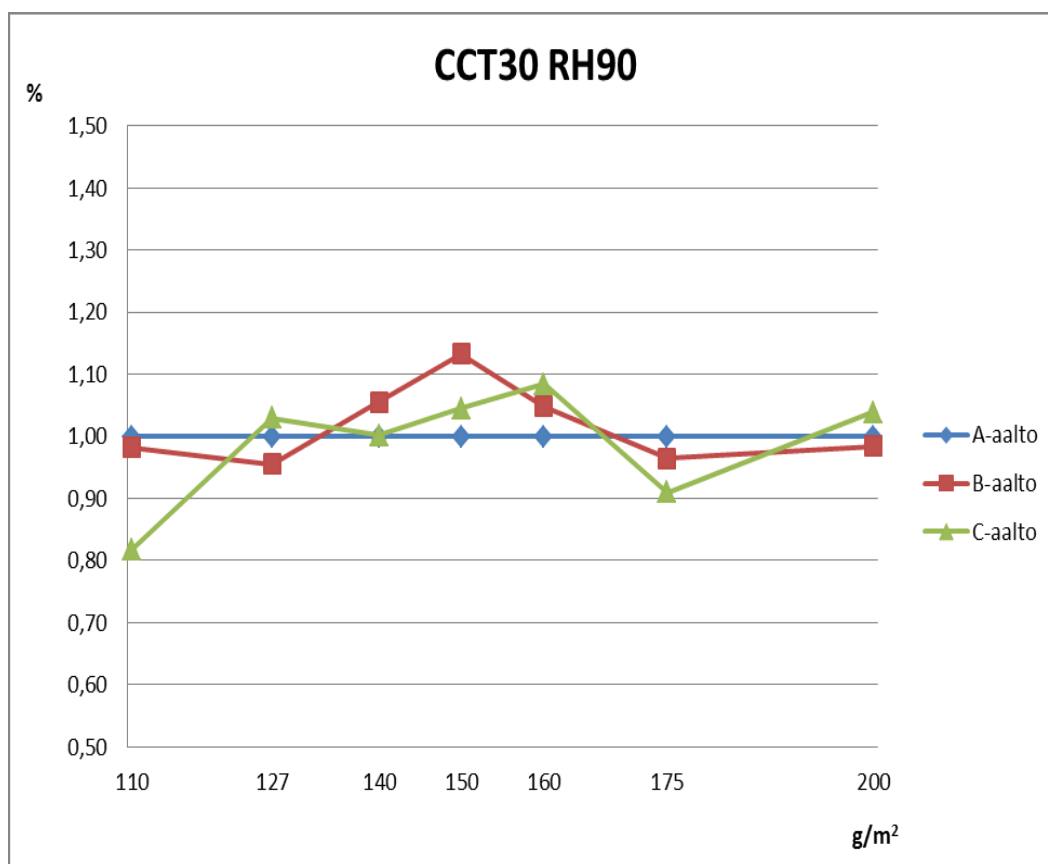
7.4.1 CCT

Eri neliömassoista mitatut CCT30-arvot RH50:ssä ovat kuvassa 36. Kuvaajasta nähdään, että CCT-arvot ovat hyvin lähellä toisiaan kaikilla aaltoprofiileilla mitattuna. Huomattavia eroja ei ole, mutta 110 g/m² ja 150 g/m² neliömassoilla pientä eroa löytyy aaltoprofiilien välillä. Mitä pienempi aalto, sen parempia arvoja CCT30:lla on saatu. B-aallolla tulokset ovat hiukan parempia kuin A- tai C-aallolla. Muilla neliömassoilla eroa ei ole. Kuvaajan janat kulkevat melkein päällekkäin.



Kuva 36. CCT30-arvot RH50 eri neliömassoilla A-, B- ja C-aallolla mitattuna. Arvot on esitetty prosentteina A-aaltoon verrattuna.

110 g/m² neliömassalla B-aallolla on parempi puristuslujuus luultavasti, koska pienellä aallolla ei esiinny aallon lommahtamista samalla tavoin kuin suuremmilla aalloilla. Ohuempi aallotuskartonki myös taipuu helpommin pienille aalloille eikä vaurioidu aallotuksen aikana tai näyteliuskaa asetettaessa mittauspidikkeeseen. Hiukan paremmat arvot B-aallolla voivat johtua myös siitä, että pienemmällä aaltoprofiililla mitattavassa liuskassa puristumista estäviä aallon harjoja on enemmän. 150 g/m² neliömassalla B-aallolla mitatut arvot ovat huomattavasti paremmat kuin muilla aaltoprofiileilla. 150 g/m² neliömassalla B-aallolla arvot ovat myös suuremmat kuin B-aallon 160 g/m² neliömassalla. Tutkittaessa laboratorion mittaamia SCT-arvoja samasta konerullasta huomattiin, että SCT-arvot olivat myös huomattavan suuret 150 g/m² arvoiksi. Luultavasti siis sillä hetkellä, kun 150 g/m² ajoa ajettiin kartonkikoneella, oli massanvalmistus ja pesu onnistunut erityisen hyvin sekä kartonkikoneella ajoparametrit olivat kaikki kunnossa. On kuitenkin mielenkiintoista, mikseivät A- ja C-aalto antaneet myös tavallista korkeampia arvoja. Voi olla, että juuri tässä käytetty B-aallon profiili on sopivin käytettäväksi 150 g/m² neliömassalla ja tuo esiin aallotuskartongin potentiaalin. Kuvassa 37 on esitetty CCT30-mittauksien arvot RH90.

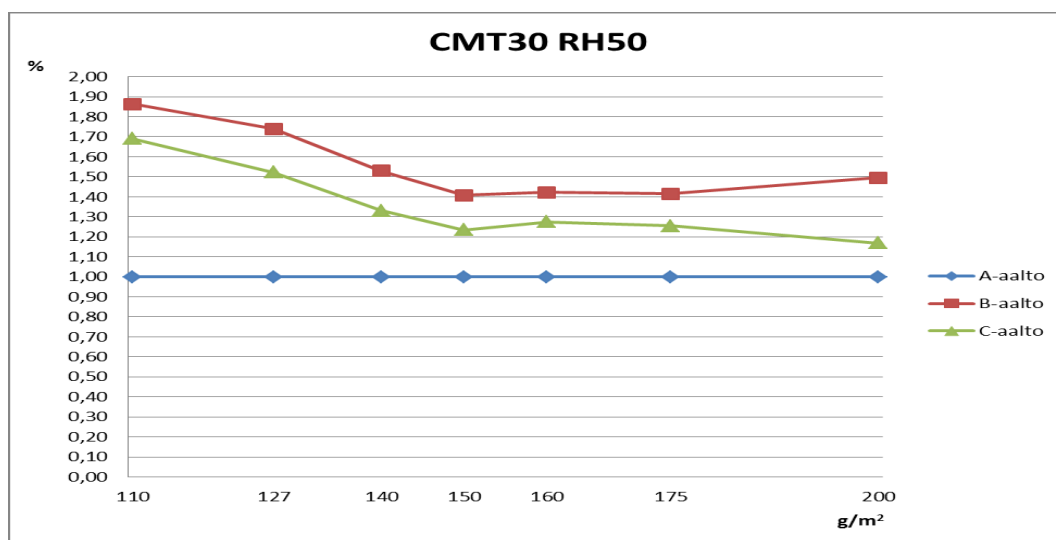


Kuva 37. CCT30-arvot RH90 eri neliömassalla A-, B- ja C-aallolla mitattuna. Arvot on esitetty prosentteina A-aaltoon verrattuna.

RH90 mitatuilla CCT-arvoilla 110 g/m^2 neliömassalla samaa ilmiötä ei esiinny kuin RH50:ssä. B- ja A-aalto saavat yhtä suuret arvot 110 g/m^2 neliömassalla ja C-aalto antaa selvästi heikomman tuloksen. 150 g/m^2 kohdalla B-aallon vahvat tulokset näkyvät yhä. Eli kosteuspitoisuuden muutos tuo eroja eri aaltoprofiilien käyriin kuvaajassa, mutta erot voidaan selittää myös suuremmilla hajonnoilla, joita korkea kosteus aiheuttaa. CCT30-kuvaajat ovat liitteessä 3.

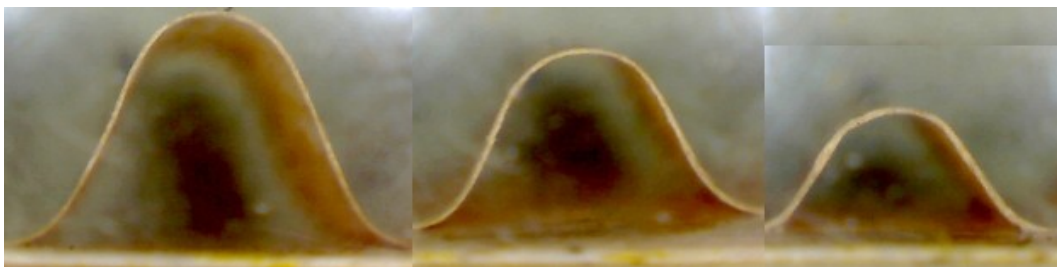
7.4.2 CMT

Eri neliöpainoista mitatut CMT30-arvot RH50:ssä ovat kuvassa 38. Arvot on jaettu A-aallon keskiarvoilla. Kuvaajassa näkyy, miten pienemmät aaltoprofiilit antavat parempia arvoja kuin A-aalto ja niiden paremmuus tulee selvemmin esiin, mitä pienempi neliömassa on kyseessä. B-aalto antaa korkeimmat ja A-aalto matalimmat puristuslujuusarvot. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että pienillä neliömassoilla tulisi käyttää pientä aaltoprofiilia. B-aallon korkeita arvoja suuremmillakin neliömassoilla selittää, se että pienemmällä aaltoprofiililla aallot ovat pienempiä ja mitattavaan kartonkiliuskaan mahtuu enemmän puristuslujuutta tuovia aaltoja. B aaltoprofiililla aallotuskartonkiliuskassa on 17 aaltoa, C aaltoprofiililla 14 aaltoa ja A aaltoprofiililla 10 aaltoa.



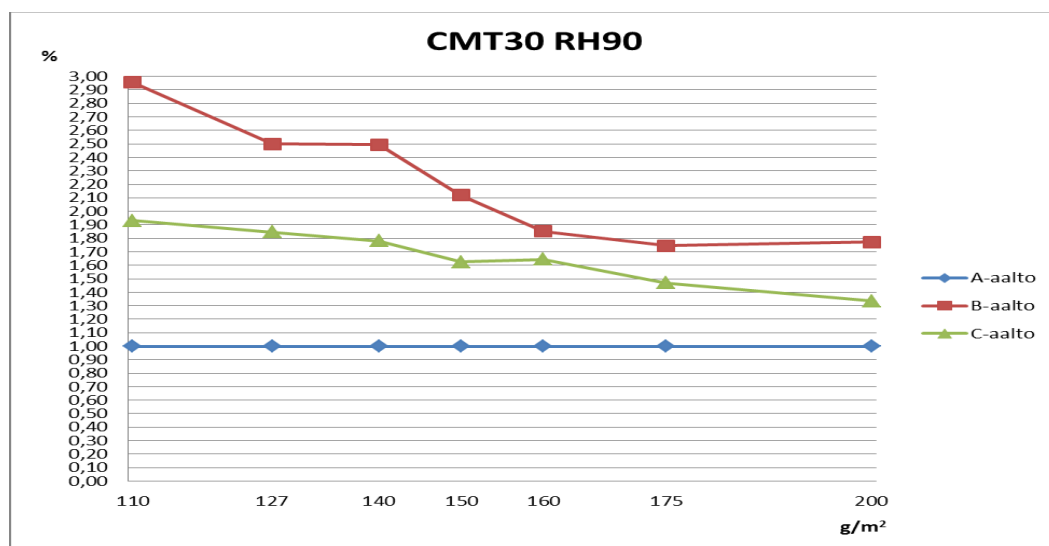
Kuva 38. CMT30-arvot RH50 eri neliömassoilla A-, B- ja C-aallolla mitattuna. Arvot on esitetty prosentteina A-aaltoon verrattuna.

Myös aaltojen muodolla on merkitystä. Kuvasta 39 erottuu hyvin, kuinka A-aallolla aallon kyljet ovat suhteessa paljon pidemmät kuin pienemmillä aalloilla. Näin ollen A-aalto lommahtaa paljon herkemmin. B-aallolla aallotetulla kartongilla puristusta kantavia aallon harjoja on enemmän eikä aallon puristumisessa esiinny yhtä paljon taivutusta aallon kyljissä vaan aallon kyljet vastustavat paremmin puristusta.



**Kuva 39. USB-mikroskooppikameralla kuvatut aaltoprofiilit standardinmu-
kaisesta melkein A-aallosta, C-aallosta ja B-aallosta.**

Kuvassa 40 on esitetty CMT-mittausten arvot RH90 eri neliömassoilla, kun ne on jaettu A-aallon keskiarvolla. Kuvaajan muoto on samanlainen kuin kuvaajassa 39, jonka arvot ovat RH50:ssä.

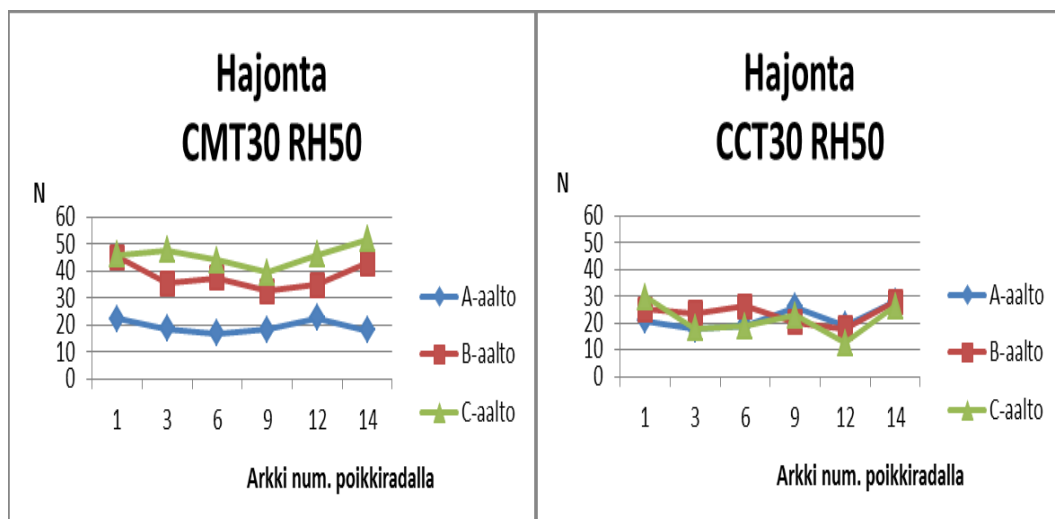


**Kuva 40. CMT30-arvot RH90 eri neliömassoilla A-, B- ja C-aallolla mitattu-
na. Arvot on esitetty prosentteina A-aaltoon verrattuna.**

Eri kosteuksissa kuvaajissa on samanlainen muoto, mutta RH90:ssä erot eri aalto-profiilien välillä ovat korostuneemmat. RH50:ssä B- ja C-aaltojen käyrät kulkevat vaakasuorina 150 g/m² lähtien, RH90:ssä vasta 160 g/m² lähtien. 110 g/m² neliö-massassa RH50:ssä B-aallon tulokset on noin 1,85 kertaiset A-aaltoon verrattuna, kun taas RH90:ssä B-aallon tulokset ovat jopa 3 kertaiset. RH90:ssä aaltoprofiili-en tuomien erojen korostuminen voi johtua siitä, että korkeassa kosteudessa kuitu-jen väliset sidokset eivät ole yhtä vahvoja. Suurella A-aallolla lommahdus tapah-tuu herkemmin, kun puristusta vastustavat sidokset ovat heikompia. CMT30-kuvaajat ovat liitteessä 4.

7.4.3 Hajonnat

Mittaustulosten hajonta kertoo, miten suurta vaihtelua mittausten tuloksissa esiin-tyy. Eli miten luotettava mittausta on. Kuvassa 41 on kuvaajat CMT30:n ja CCT30:n tulosten hajontojen keskiarvoista. Pystyakselilla on hajonnan määrä Newtonina ja vaaka-akselilla poikkirata-arkkien numerot, joista mittaukset on tehty. Samassa mittapisteessä on keskiarvo kaikista eri neliömassojen hajonnoista. Kuvaajissa eri aaltoprofiileilla tehtyt mittaukset näkyvät omina suorinaan.



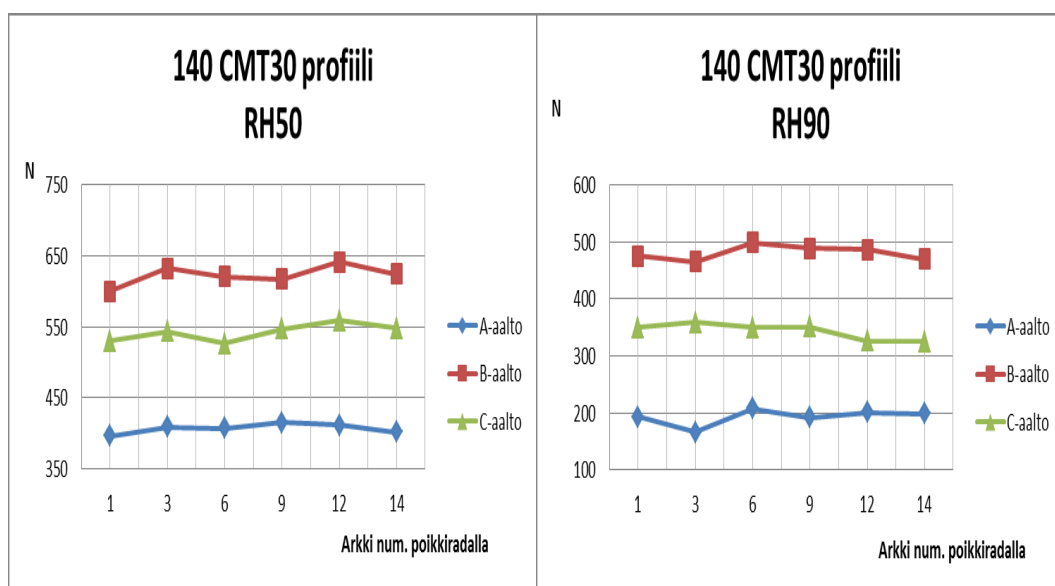
Kuva 41. CMT30 ja CCT30 mittauksien hajonnat eri aaltoprofiileilla. Hajonta (N) on pystyakselilla ja vaaka-akselilla poikkirata arkkit, joista mittaukset on tehty.

CCT-mittauksessa hajonnat ovat suurin piirtein yhtä suuria kaikilla aaltoprofiileilla tehdyillä mittauksilla. CMT-mittauksessa A-aallolla hajonta on huomattavasti pienempää kuin B- tai C-aallolla. CMT-mittauksessa eri aaltoprofiileilla hajontojen ero johtuu luultavasti aallotuskartonki näytteen valmistelussa erilaisista välineistä. A-aallolla CMT-kampa, joka pitää aallotettua kartonkiliuskaa paikoillaan sen teippaamisen ajan on erilainen kuin B- ja C-aalloilla. B- ja C-aaltojen CMT-kampaa on vaikeampi käyttää. Tästä syystä osa mitattavista näytteistä voi olla jo ennen puristuslujuusmittausta vaurioituneita, mikä aiheuttaa hajontaa tuloksiin. Liitteessä 2 on kuvat A-aallon sekä B- ja C-aallon näytekammoista.

Aallotuskartongin poikkirata on 6 metriä pitkä. Siitä leikataan 14 kohtaa näytearkit ja arkeista 1, 3, 6, 9, 12 ja 14 mitataan aallotuskartongin puristuslujuudet. CMT0-mittauksessa ei mitattavan näytteen paikalla poikkiradassa ole merkitystä. Suurimmat hajonnat eri neliömassoilla osuvat sattuman varaisesti mille tahansa arkille. Tämä johtuu luultavasti siitä, että CMT0:ssa hajonnat ovat yleensäkin moninkertaiset muihin mittauksiin nähden. Eivätkä tulokset ole kovin luotettavia. CMT30 RH50:ssä ja RH90:ssä suurimmat hajonnat ovat radan reunoilla arkeissa 1 ja 14. Tämä johtuu luultavasti siitä, että kartonkikoneen reunoilla formaatioprofiili ei ole aivan yhtä hyvä kuin keskellä rataa. CCT15-mittauksessa suurimmat hajonnat ovat arkeissa 1 ja 14. CCT30- mittauksissa RH50:ssä ja RH90:ssä suurin hajonta esiintyy arkissa 14. Tämä johtuu luultavasti siitä, että kartonkikoneen käyttöpuolella reunimmaisessa arkissa on formaatio. Liitteessä 6 ja 7 ovat hajonta-kuvaajat.

7.4.4 Kuituorientaation vaikutus poikkiradalla

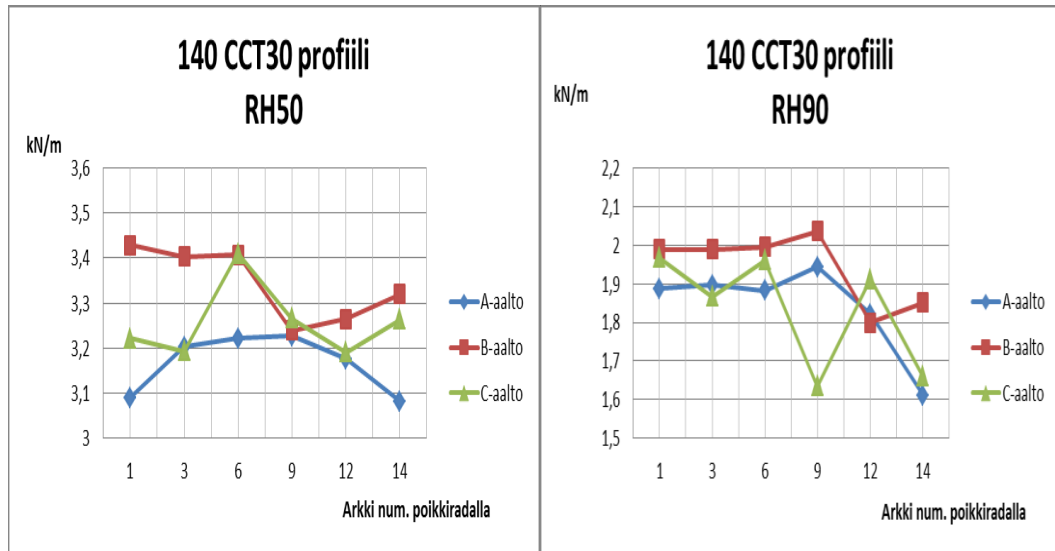
Edellisessä kappaleessa tutkittujen mittausten hajontojen perusteella voidaan sanoa, että sillä mistä kohtaa kartonkikoneen rataa mitattavan näytearkin ottaa, on merkitystä puristuslujuudelle. Eri kohtaa radasta otetuilla näytteiden tuloksilla on erilainen hajonta, mutta sitä ovatko jossain kohtaa rataa puristuslujuus tulokset korkeammat kuin muualla voidaan selittää myös kuituorientaation avulla. Kuvas-
sa 42 on 140 g/m² neliömassaisen CMT30 mittausten keskiarvot poikkirata-
arkkien mukaan RH50:ssä ja RH90:ssä.



Kuva 42. CMT30 mittausten keskiarvot poikkirata-arkkien mukaan RH50:ssä ja RH90:ssä.

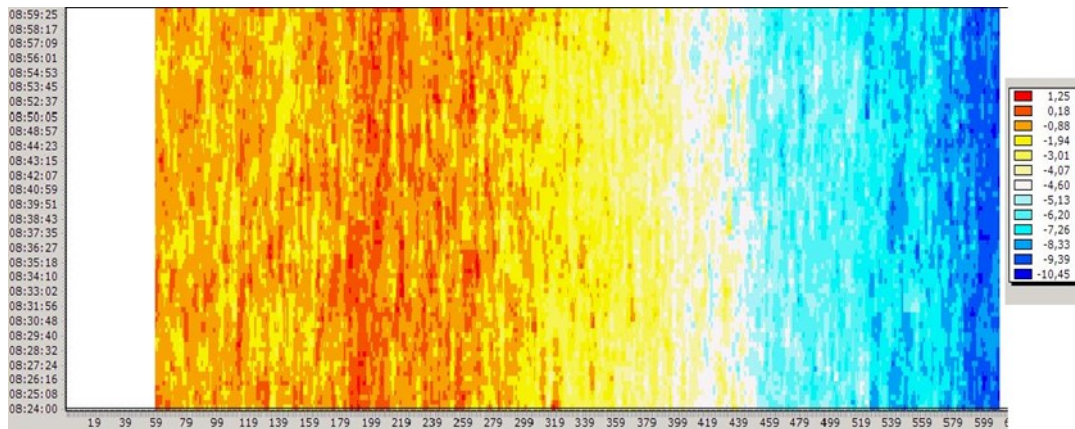
CMT:tä mitattaessa kuvaajien suorat eri aaltoprofiileilla ovat melkein täysin vaakasuorat. Vain ensimmäisen (1) ja viimeisen (14) arkin puristuslujuudet ovat hiukan matalammat.

Jos CCT-mittauksista tehdään samanlaiset kuvaajat, on puristuslujuusprofiili ai-
van erinäköinen. Kuvassa 43 on 140 g/m² neliömassaisten CCT30 mittausten kes-
kiarvot poikkirata-arkkien mukaan RH50:ssä ja RH90:ssä. Kuvaajista nähdään,
että puristuslujuudet eivät ole yhtä hyvät koko radan leveydeltä vaan arvot vaihte-
levat huomattavasti mitattavasta radan paikasta riippuen.



Kuva 43. CCT30 mittausten keskiarvot poikkirata-arkkien mukaan RH50:ssä ja RH90:ssä.

Kuvassa 44 oleva kartonkikoneen kuituorientaatio selittää CCT-mittausten vaihte-
levia arvoja kartonkikoneen radalla. Kuvan kuituorientaatio on otettu samalta ko-
nerullalta kuin mitattavat näytteet kuvassa 43.

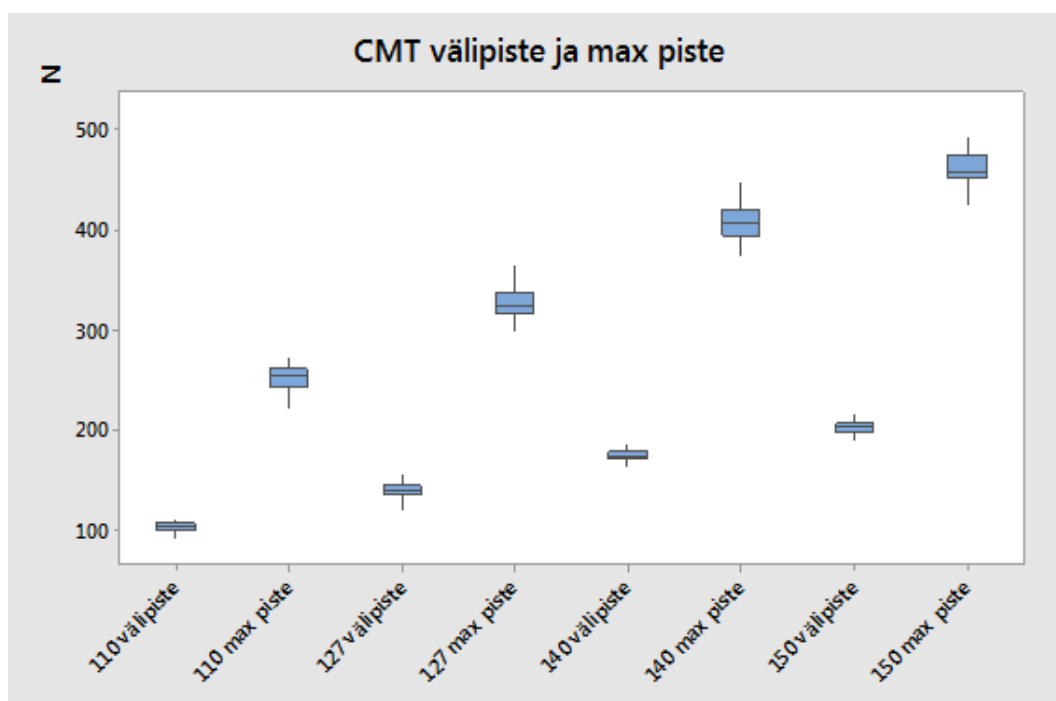


Kuva 44. Kartonkikoneen kuituorientaatio

Kuvassa punertava väri merkitsee, että kartonkikoneen radassa kuitujen vinouskulma on oikealle päin kääntynyt, oranssi väri merkitsee, että kuidut suoraan koneensuuntaisesti ja sinertävä väri merkitsee, että kuidut ovat vasemmalle kääntyneitä. Kuvaajissa koneen hoitopuolelta otetut näytearkit antavat korkeampia puristuslujuuksia kuin käyttöpuolelta otetut arkit. Tämä on melko ristiriitainen tulos, sillä kuituorientaatio-kuvan mukaan koneen käyttöpuolella kuidut ovat asettuneet poikkisuuntaan ja kuitenkin tältä puolelta ovat puristustulokset heikompia. CCT:n tulisi olla teorian mukaan sitä parempi, mitä enemmän kuituja on asettunut poikkisuuntaan. Osa syynä ristiriitaisiin tuloksiin voi olla, ettei olla täysin varmoja antaako orientaatio-mittari vain kartongin pintaorientaation. Tämän lisäksi orientaatiokulma on luultavasti vain osa syynä CCT-tuloksiin. CMT-tuloksissa kuitujen orientaatiolla ei ole yhtä suurta merkitystä, sillä CMT:ssä ei tarvita poikkisuuntaista puristuslujuutta. Liitteessä 7 ovat puristusprofiilit ja liitteessä 8 on esitetty kuvat kartonkikoneen kuituorientaatioprofiileista poikkiratanäytteiden oton hetkeltä.

7.4.5 CMT-käyrän välipiste

CMT:n välipisteen määrittäminen Lorenzen & Wetterin Crush Testerillä osoittautui yllättävän hankalaksi. Crush Testeristä ei saatu ulos jännitettä, jonka avulla CMT-käyrä olisi voitu piirtää, sillä jännitteen ulostulo-liitos oli vaurioitunut. Niinpä välipiste arvioitiin puristusmittauksen aikana silmämääräisesti. Crush Testeristä luettiin puristustapahtuman aikana näytöllä hetkeksi pysähtyvä puristusluku (N). Kuvassa 45 on kuvaaja, missä on laskettu keskiarvot CMT:n välipisteistä ja maksimiarvoista 110 g/m², 127 g/m², 140 g/m² ja 150 g/m² neliömassoilla.



Kuva 45. Boxplot-kuvaaja CMT:n välipisteistä ja maksimiarvoista 110 g/m², 127 g/m², 140 g/m² ja 150 g/m².

Boxplot-kuvaajassa 50 % mitatuista arvoista on sinisten laatikkojen sisällä ja laatikoista lähtevät viivat osoittavat tulosten hajonnan. Kuvaajasta voidaan nähdä, että CMT:n välipisteissä laatikot ovat paljon ohuempia. Eli 50 % arvoista osuu paljon pienemmällä alueella kuin CMT:n maksimipisteissä. Myös hajonta on huomattavasti pienempää kuin CMT:n maksimipisteissä. Välipiste on siis yksikäsitetsempi kuin varsinainen CMT-arvo.

Kuvassa 46 on USB-mikroskooppikameralla otetut kuvat kahdesta aallosta. Vasemmanpuoleisen aallon puristaminen on lopetettu välipisteen kohdalla. Oikeanpuoleista aaltoa on puristettu, kunnes CMT saavuttaa maksimiarvonsa. Välipisteseen asti puristettu aalto näyttää koskemattomalta. Vaikka aalto näyttää vaurioitumattomalta, on se silti menettänyt lujuuttaan. Kädessä aallotuskartonki tuntuu pehmeämmältä kuin puristamaton aallotuskartonki. Aallon ulkonäkö tai se, ettei aaltopahvin paksuus ole muuttunut ei siis vielä kerro aallotuskartongin vaurioitumattomuudesta.



Kuva 46. USB-mikroskooppikuvat CMT-välipisteeseen puristetusta ja CMT:n maksimiarvoon asti puristetusta aallosta.

Välipistettä kokeiltiin myös mitata vaihtamalla Crush Testerin asetuksia niin herkeksi, että laite lopettaa näyteliuskan puristamisen, kun puristus hetkesi hidastuu välipisteen kohdalla. Tämä ei tuottanut haluttua tulosta. Puristinta ei saatu asetettua tarpeeksi herkeksi.

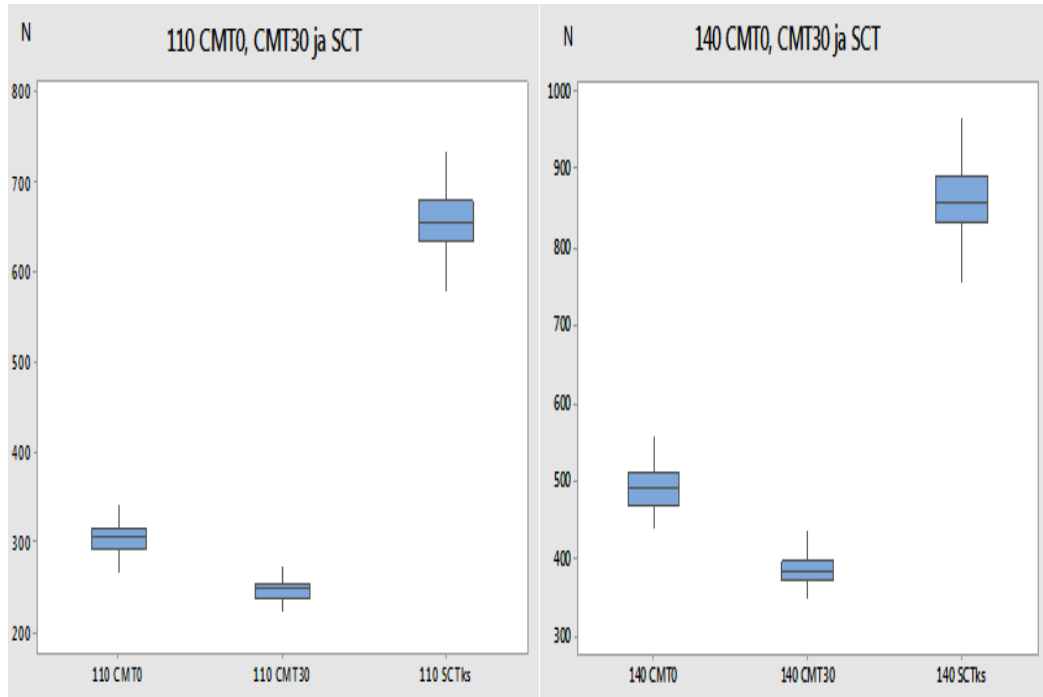
Näiden tulosten perusteella voidaan sanoa, että CMT:n välipiste antaisi tarkemman tuloksen aallotuskartongin litistyslujuudesta kuin varsinainen CMT-arvo. Käytettävissä olevilla laitteilla välipisteen määrittäminen on liian hankalaa. Silmämääräisessä välipisteen merkitsemisessä puristusmittauksen aikana tunnistettava välipiste saatiin vain neliömassoilta 110 g/m^2 , 127 g/m^2 , 140 g/m^2 ja 150 g/m^2 . Liitteessä 9 ovat CMT:n välipiste ja maksimipiste kuvaaja.

7.4.6 Näytteenoton ja käsittelyn vaikutus laboratorion arvoihin

Osana kokeellista osaa on pohdittu aallotuskartonkitehtaan laboratoriossa kartongille tehtävien mittausten luotettavuutta. CMT30-mittauksissa tällä hetkellä mitataan 8 rinnakkaismääritystä. Standardin mukainen määrä rinnakkaismäärityksiä on 10 kappaletta. Jos mittauksia tehtäisiin 10 kappaletta, olisi tilastollinen luotettavuus hiukan parempi eikä kahden lisänäytteen tekemiseen mene paljoa enempiä aikaa. Toinen luotettavuutta lisäävä tekijä olisi lisätä poikkiradalta mitattavien arkkien määrää. Kartonkikoneen rata jaetaan 14 arkkiin. Tällä hetkellä mittauksia tehdään arkeista 3, 6, 9 ja 12. Jotta saataisiin laatu dataa koko kartonkikoneen radan leveydeltä, kannattaisi mitattaviin arkkeihin lisätä arkit 1 ja 14. Tutkittaessa miten suuri ero lujuuksien keskiarvoihin tulee jos mitataan myös arkit 1 ja 14 tai niitä ei huomioida, oli ero melko pieni. Uloimmaisat arkit laskivat CMT30- ja CCT30-mittauksen tulosten keskiarvoja hiukan. Lujuuksien menetys oli kuitenkin hajontaa pienempää. Hajonnatkin kasvoivat hiukan jos arkit 1 ja 14 otettiin mukaan tarkasteluun. Kuitenkin muutos oli niin minimaalista, ettei se huononna tuotteen laatua merkittävästi. Laajemmista mittauksista olisi hyötyä, jotta tiedettäisiin koko kartonkikoneen leveydeltä radan laatu. On myös otettava huomioon, että radan reunoilta myydään asiakkaille rullia eikä niille nyt tehdä laadun tarkkailua

Laboratorioon tuodaan joka toisesta konerullasta poikkiratanäyte, josta tehdään käsin mittauksia. Näitä mittauksia ovat CMT0- ja CCT15- määritykset. Vuoron 1. ja 3. laboratorioon tuotavasta poikkiradasta tehdään myös CMT30- ja CCT30- määritykset. Jos tehtaalla valmistetaan useampi tunti samaa neliömassaa kartonkikoneella, voi olla että nuo molemmat konerullat, joista CMT30- ja CCT30-mittaukset tehdään, ovat samaa neliömassaa vaikka päivän aikana neliömassa vaihtuisi useaan kertaan. On siis riski, ettei läheskään kaikista neliömassoista, joita tehtaalla valmistetaan saada kaikkia standardin mukaisia määrityksiä. Asiakkaitten ja tehtaan oman laadun seurannan kannalta, voisi olla parempi, ettei määritettäisi tiettyä poikkiratanäytteen numeroa, josta mittaukset tehdään. Vaan laborantti määrittäisi mitattavat näytteet tilanne- ja päiväkohtaisesti.

Kuvassa 47 on esitetty 110 g/m² ja 140 g/m² neliömassoilla CMT0-, CMT30- ja SCT-mittausten tulokset Boxplot-kuvaajissa. Vasemman puoleisin laatikko edustaa CMT0:n tuloksia, keskimäisen CMT30:n tuloksia ja oikean puoleinen SCT:n tuloksia. Laboratorion mittaamat arvot ovat ajalta 1.9 – 30.11.

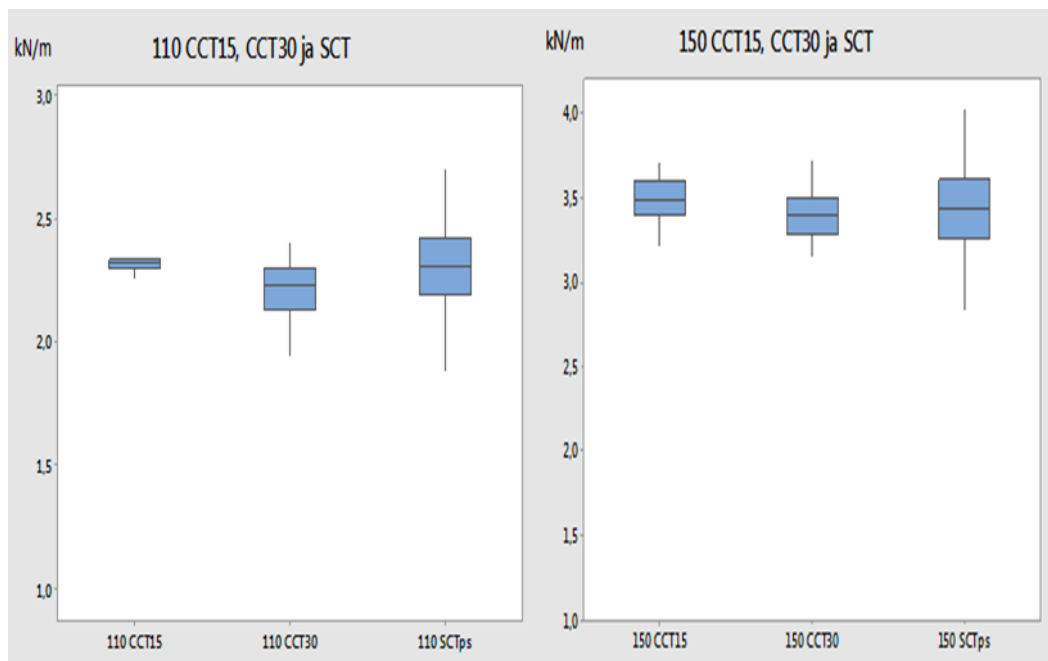


Kuva 47. CMT0, CMT30 ja SCT mittausten tulokset neliömassoilla 110 g/m² ja 140 g/m²

Kuvaajista nähdään, miten eri mittausten luotettavuus eroaa, arvioitaessa aallotuskartongin litistyslujuutta. Molemmilla neliömassoilla selvästi tarkimpaan tulokseen ja pienimpään hajontaan päästään CMT30 mittauksella. CMT0:n arvo on noin 30 % korkeampi kaikilla neliömassoilla. Tämän perusteella mittausta voisi käyttää suuntaa-antavana laadunseurantamittarina, mutta Boxplot-kuvaajan perusteella arvot eivät ole kovinkaan luotettavia ja hajonta on suurta. Osa syynä suureen hajontaan CMT0:ssa on itse mittaus. Mittaus pyritään suorittamaan heti, kun poikkiratanäyte saapuu laboratorioon. Ajalla, miten pitkään näyte odottaa mittauksista on merkitystä tuloksiin. Mitä pidempään kartonki odottaa laboratoriossa, sitä enemmän se kerää kosteutta itseensä. Heti aallotetulla kartonkiliuskalla on matalampi kosteuspitoisuus ja näin ollen korkeampi jäykkyys kuin laboratorion RH50:n kosteusolosuhteisiin ”sopeutuneella” [26]. Eli kartongin puristuslujuusarvot huononevat, mitä pidempään kartonki odottaa laboratoriossa. Myös aaltoprofiili voi muuttua kosteuden johdosta. Osa CMT0-mittauksen epäluotettavuudesta

johtuu siitä, että käytännönsyistä aika, jonka kartonkinäyte odottaa mittaamista vaihtelee suurestikin. Tämä vaikuttaa tuloksiin. Koska mittaus on suoritettava mahdollisimman nopeasti, rinnakkaisnäytteitä jokaisesta radan paikasta tehdään vain kaksi. Kahdesta rinnakkaisnäytteestä ei saada luotettavaa tilastollista tarkastelua. Liitteessä 10 on CMT0, CMT30 ja SCT – kuvaajat.

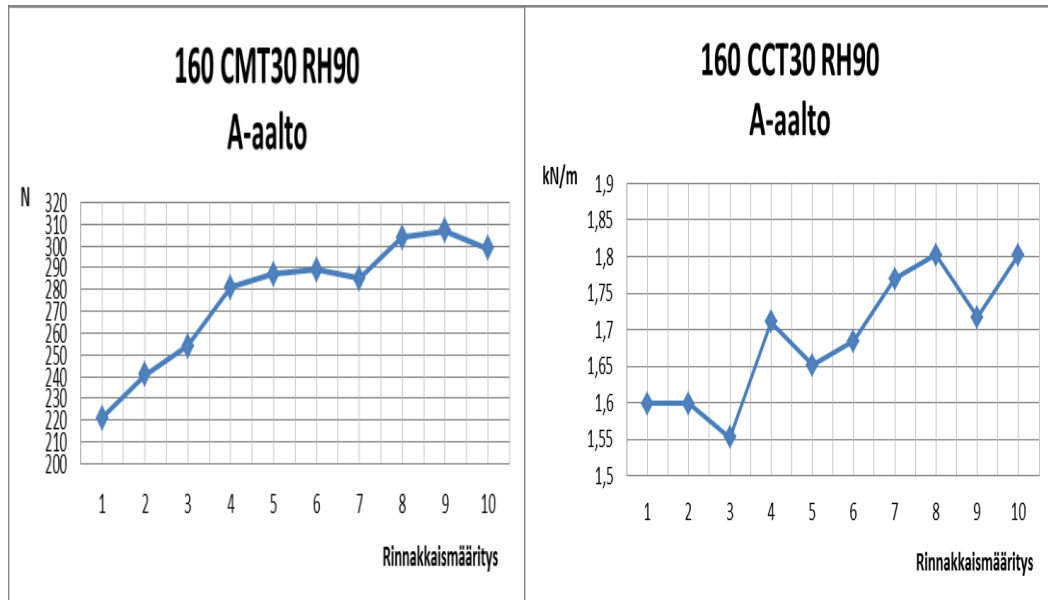
Kuvassa 48 on esitetty 110 g/m² ja 150 g/m² neliömassoilla CCT15-, CCT30- ja SCT-mittausten tulokset Boxplot-kuvaajissa. Vasemman puoleisin laatikko edustaa CCT15:n tuloksia, keskimmäinen CCT30:n tuloksia ja oikean puoleinen SCT:n tuloksia. Laboratorion mitaamat arvot ovat ajalta 1.9 – 30.11.



Kuva 48. CCT15, CCT30 ja SCT mittausten tulokset neliömassoilla 110 g/m² ja 150 g/m²

CCT15-arvo mitataan 15 minuutin kuluttua, siitä kun näyteliуска on tullut laboratorioon ja aallotettu. CCT15-mittaus ei boxplot-kuvaajan perusteella ole epäluotettava niin kuin CMT0-mittaus. Hajonnat ovat jopa pienempiä kuin CCT30-mittauksessa. Liitteessä 11 on CCT15, CCT30 ja SCT- kuvaajat.

Kuvassa 49 on esitetty RH90:ssä CMT30- ja CCT30-mittausten 10 rinnakkaismäärittystä samasta koepisteestä 160 g/m² neliömassalla. Kuvaajissa näkyy, miten herkkä mittauksen luotettavuus on kosteuden vaihtelulle.



Kuva 49. RH90:ssä CMT30 ja CCT30 mittausten 10 rinnakkaismäärittystä samasta koepisteestä

Mitattaessa RH90:n näytteitä, kartonkiliuskoja pidetään 4 tuntia ilmastoituudessa 90 % kosteudessa ja aallotettuja kartonkiliuskoja pidetään 30 minuuttia ilmastointikaapissa 90 % kosteudessa. Kun näyteliuskoista mitataan puristuslujuus, ne tuodaan ilmastointikaapista kannellisessa rasiassa laboratorioon, jotta kosteusolosuhteet eivät muuttuisi. 10 rinnakkaismäärittäyksen tekemisen aikana näytteiden kosteuspuiteisuus rasiassa muuttuu huomattavasti, koska rasiassa nostetaan jokaisen näyteliuskan kohdalla. Kuvaajista nähdään, miten kartongin kuivuminen vaikuttaa kartongin jäykkyyteen. Viimeisinä mitattujen tulosten arvot ovat CMT30 noin 35 % ja CCT30 noin 15 % suuremmat kuin ensimmäisinä mitattujen arvot. Rinnakkaismäärittäysten keskiarvo ei siis ole täysin luotettava, kun standardin mukaan näytteet tulisi mitata 90 % kosteuspuiteisuudessa. 90 % kosteudessa mitattavia CMT30 sekä CCT30 ei myöskään mitata poikkiratapainojen mukaan, vaan näytteiden keskiarvo edustaa koko rataa. Enemmän tietoa voisi saada jos kartonkikoneen radan puristuslujuusprofiili määritettäisiin useasta kohtaa rataa myös 90 % kosteudessa. Liitteessä 12 on CMT ja CCT kuvaajat kosteuden muuttumisen vaikutuksesta RH90:n näytteisiin eri aaltoprofiileilla.

7.5 Yhteenveto

Kokeellisessa osassa oli ensin tavoitteena tutkia, miten aallotuskartongin CMT:n ja CCT:n tuloksiin vaikuttaa jos mitattavat testiliuskat aallotetaan erikokoisilla aalloilla. Aaltoprofiileina käytettiin standardin mukaista lähellä A-aaltoa olevaa aaltoa, B-aaltoa ja C-aaltoa.

Kirjallisuus osan perusteella tiedettiin, että erilaisia aaltoprofiileja käytetään erilaisiin tuotteisiin, joilla on erilaiset lujuusominaisuudet. Aaltoprofiililla voidaan vaikuttaa aaltojen lujuuteen. Tämän pohjalta lähettiin selvittämään saavutetaanko eri neliömassoilla eri lujuuksia, kun käytetään eri aaltoprofiileja.

Kokeellisessa osassa selvisi, että CCT-arvoihin syntyy eroa eri aaltoprofiilien välille matalilla neliömassoilla. 110 g/m^2 neliömassalla B-aallolla saavutettiin selvästi parhaat puristuslujuusarvot. Tämä johtuu siitä, että pienellä aallolla ei tapahdu niin herkästi lommahduksia kuin isommilla aalloilla. 150 g/m^2 neliömassalla B-aallon arvot olivat selvästi korkeammat kuin A- tai C-aallon. Näin suurta eroa voi selittää, se että juuri käytössä ollut B-aallon muoto on ihanteellinen 150 g/m^2 aallotuskartongille ja tuo esiin sen potentiaalin parhaiten. Muilla neliömassoilla eroja ei eri aaltojen väliltä löytynyt.

CMT-arvoilla eri aaltoprofiilien väliset lujuuserot näkyivät erityisen selvästi. B-aallolla saavutettiin kaikilla neliömassoilla korkeimmat litistyslujuus arvot ja A-aallolla matalimmat. Tämä johtuu siitä, että pienemmällä aallolla aallotetulla kartongilla on useampia aaltoja näyteliuskassa. Suurempi määrä aaltoja antaa enemmän tukea, kun aallon harjoja litistetään. 150 g/m^2 neliömassaan asti ohuet kartongit antoivat sitä korkeampia CMT-arvoja, mitä pienempää aallotusprofiilia käytettiin. Tämä johtuu siitä, että ohut kartonki lommahtaa helposti suurta aaltoa puristettaessa. Korkeammassa kosteudessa eri aaltoprofiilien tuomat erot vain korostuivat, kun heikentyneet kuitusidokset lisäsivät aaltojen lommahtamista.

Mitatuista arvoista tehtiin puristuslujuusprofiileja, jotta nähtäisiin eroaako eri kohdissa kartonkikoneen poikkirataa tehtyjen mittausten arvot toisistaan. CMT:llä merkittävää eroa ei löytynyt. Ainoastaan poikkiradan reunat antoivat hiukan matalampia tuloksia. Sen sijaan CCT:llä puristuslujuus vaihteli paljon poikkiradan

paikasta riippuen. Yleisesti koneen hoitopuolella oli korkeammat arvot kuin käyttöpuolella.

Mitattujen arvojen hajontoja tutkimalla, arvioitiin kuinka luotettavia tulokset eri aaltoprofiileilla olivat. CCT:llä hajonnat eivät eronneet toisistaan eri aaltojen välillä. CMT:llä eroa syntyi. A-aallolla hajonta oli selvästi pienempää mittaustulosten välillä kuin B- tai C-aallolla. Tämän epäiltiin johtuvan erilaisista näytteenvalmistelukammoista.

Lopuksi käsiteltiin laboratorion näytteenottoa ja käsittelyä ja sen vaikutusta laboratorion mittaamiin arvoihin.

8 KOEAJO MATALALLA NELIÖMASSALLA

8.1 Tavoitteet

Matalalla neliömassalla tehdyllä koeajolla aallotuskartonkitehtaalla oli tavoitteena tutkia, miten eri aaltoprofiilit, standardin mukainen melkein A-aalto, B-aalto ja C-aalto vaikuttavat aallotuskartongista saataviin CMT:n ja CCT:n lujuusarvoihin matalilla neliömassoilla ja mikä aaltoprofiili ennustaa parhaiten FCT- ja ECT-arvoja. Aiempien mittausten perusteella tiedettiin, että matalissa neliömassoissa korkeammat CMT- ja CCT-arvot saadaan pienimmällä aaltoprofiililla. Nyt tahdottiin tutkia asiaa tarkemmin ajamalla koeajo, missä toisessa koeajopisteessä oli tehtaalle tavanomaiset ajoarvot ja toisessa ajoarvoja heikennettiin. Hypoteesi oli, että B-aallolla lujuusarvot eivät putoa yhtä voimakkaasti kuin A- tai C-aallolla. Koeajosta saadut aallotuskartongit valmistettiin aaltopahviksi aaltopahvitehtaalla ja niistä mitattiin FCT ja ECT B-aallolla sekä C-aallolla. Hypoteesi oli, että FCT- ja ECT- arvot seuraavat CMT- ja CCT- arvoja ja B-aallolla aallotuskartongin lujuuden huonontaminen ei vaikuta yhtä paljon puristuslujuusarvoihin kuin C-aallolla. B-aallon uskottiin myös ennustavan tarkimmin aaltopahvin FCT- ja ECT-arvot.

8.2 Tutkimuskysymykset

- Saavutetaanko pienemmällä aaltoprofiililla korkeammat CCT- ja CMT-arvot matalalla neliömassalla tehdyllä koeajolla?
- Ylläpitääkö B-aalto paremmin lujuusarvonsa, kun aallotuskartongin laatua huononnetaan?
- Seuraavatko ECT- ja FCT-arvot niiden aallotuskartongista tehtyjä CCT- ja CMT-mittausten tuloksia?
- Ennustaako B-aallolla laskettu ECT luotettavammin aaltopahvin ECT- arvot kuin A-aallolla?

8.3 Käytetyt materiaalit ja menetelmät

8.3.1 Koeajon suoritus aallotuskartonkitehtaalla

Koeajo aallotuskartonkitehtaalla suoritettiin matalalla neliömassalla. Koeajossa oli kaksi koepistettä. Ensimmäisessä koepisteessä oli normaalit ajo-olosuhteet massanvalmistuksessa ja aallotuskartonkikoneella. CLC:tä, eli kierrätysmassaa, massan seassa oli 2%. Toisessa koepisteessä massanjauhatuksista oli poistettu tehoja 10 kW/t jokaiselta jauhimelta. CLC:n määrää massassa oli lisätty 10 %:n. Koeajo ajettiin kahteen kertaan. Taulukossa 5 on koeajoissa käytetty suunnitelma.

Taulukko 5. Koeajon suunnitelma aallotuskartonkitehtaalla.

	CLC:n määrä	Jauhatus
Koepiste 1	2 %	normaali
Koepiste 2	10 %	-10 KW/h

Ennen kuin koeajo aloitettiin, varmistuttiin siitä, että painonvaihto matalalle neliömassalle oli saatu kunnolla suoritettua ja laatuarvot olivat tasaiset. Koepisteistä otettiin poikkiratanäytteet, kun koepisteen arvoilla oli ajettu kokonainen konerulla. Tämä siksi, että laatu oli saatu varmasti tasaantumaan. Leikkurilta koerulliksi merkattiin samoista konerullista ensimmäisenä leikatut asiakasrullat, jotta laatu aallotuskartonkitehtaalla mitattavissa poikkiratanäytteissä olisi sama kuin aaltopahvitehtaalle lähetettävissä koerullissa. Liitteessä 13 on koeajossa käytetyt ohjeet.

8.3.2 Koeajon suoritus aaltopahvitehtaalla

Koeajo toteutettiin Heinolan Packaging tehtaalla. Molempien koepisteiden: koepiste 1. ja koepiste 2. aallotuskartongeista valmistettiin B- ja C-aaltoprofiileilla yksiaaltoista aaltopahvia. B-profililla käytettiin 110 g/m^2 lainereita ja C-profililla 140 g/m^2 lainereita. Reseptit ovat toisiaan vastaavat, kun käytetään matalaneliö-massaista aallotuskartonkia. Taulukossa 6 on koeajossa käytetty suunnitelma.

Taulukko 6. Aaltopahvitehtaan koeajosuunnitelma

Koepiste 1	B-aalto
	C-aalto
Koepiste 2	B-aalto
	C-aalto

Koepisteistä otettiin molemmilta aaltoprofiileilta 10 näytearkkia, jotta mittauksien tulokset edustavat laajempaa osaa tehdystä aaltopahvista.

8.3.3 Mittaukset

Aallotuskartonkitehtaalla laboratoriossa leikattiin koeajopisteistä otetuista poikkiratanäytteistä $40 \times 40 \text{ cm}^2$ arkkeja koko koneen leveydeltä (6 arkkia, poikkiratapainoista 1, 3, 6, 9, 12 ja 14), joista määritettiin CMT0, CMT30, CCT15 ja CCT30 RH50:ssä sekä CMT30 ja CCT30 RH90:ssä.

Aaltopahvitehtaalla koeajopisteistä otetuista näytearkeista, määritettiin ECT ja FCT RH50:ssä sekä RH80:ssä. Mittauksissa käytetyt standardit ovat liitteessä 1.

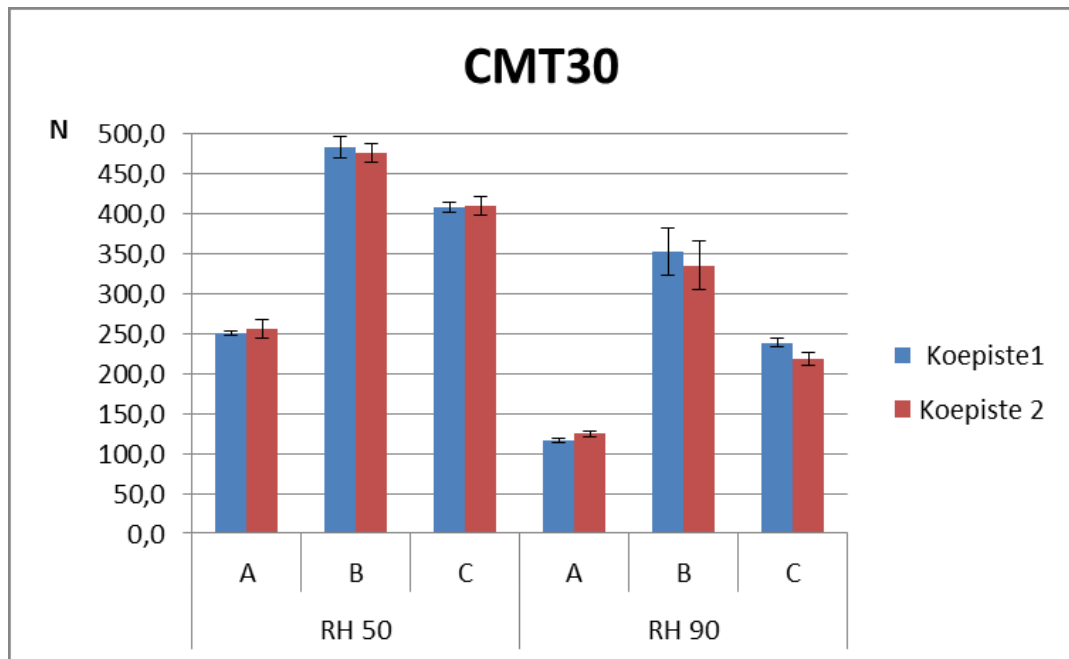
8.4 Tulosten esitystapa ja luotettavuuden arviointi

Kuvaajissa on käytetty 95 % luottamusväliä. Tulosten luotettavuuteen on vaikuttanut monia seikkoja. Koeajo aallotuskartonkitehtaalla suoritettiin kaksi kertaa, mikä ei vielä anna kovin suurta tilastollista luotettavuutta. Aaltopahvitehtaalla tuloksiin vaikuttaa niin moni tekijä, että on vaikea arvioida kuinka paljon juuri aallotuskartongilla ja sen arvojen muuttamisella on osuutta aaltopahvin tulosten muutoksiin. Aaltopahvissa muuttuvia tekijöitä ovat aallotuskartongin lisäksi esimerkiksi lainerit, liima ja ajo-olosuhteet. Virheitä mittauksiin voi syntyä myös mittaustapahtuman aikana. Vain yksi ihminen on valmistellut näytteet ja tehnyt mittaukset. Eli yksilöistä johtuva virhe voidaan eliminoida. Näytteitä on mitattu aallotuskartonkitehtaalla standardin mukainen 10 näytettä mittapistettä kohti. Aaltopahvitehtaalla näytteitä valmistettiin 20 mittapistettä kohti. Virheitä mittauksissa on voinut syntyä näytteiden valmistelussa ja mittaamisessa. RH90:n näytteissä virhettä tuo kosteuden väheneminen mittapisteen näytteitä mitattaessa.

8.5 Tulokset ja niiden tarkastelu

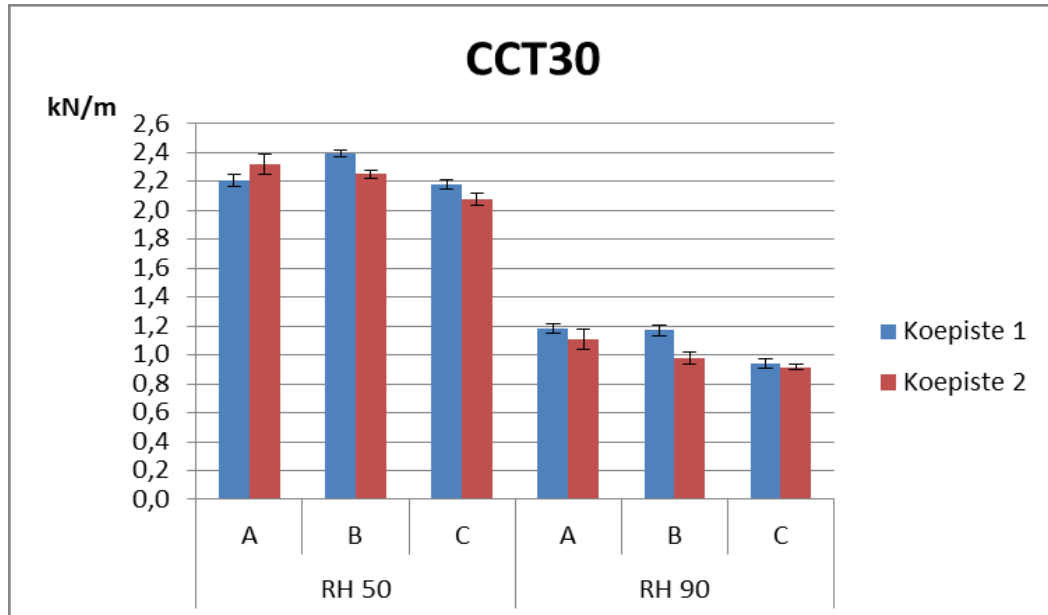
8.5.1 Aallotuskartonkitehtaan mittaukset

Kuvassa 50 on esitetty CMT30-mittauksen tulokset eri aaltoprofiileilla RH50:ssä ja RH90:ssä. Kuvaajasta nähdään, että koepisteessä 2, missä lisättiin CLC:n määrää massassa ja vähennettiin jauhatustehoa, ei ole tapahtunut kovin suurta puristulusjuuden tippumista. Sen sijaan A-aallolla arvot jopa nousivat ja RH50:ssä C-aallon arvot olivat yhtä suuret kuin 1. ja 2. koepisteissä. Arvot eivät tippuneet, vaikka lujuuksia tarkoituksella huononnettiin, johtuu luultavasti siitä, että aallotuskartongin paksuus oli kasvanut 2. koepisteessä, kun jauhatusta vähennettiin. Paksumpi kartonki lisää taivutusjäykkyyttä, mikä esti A-aaltoa lommahtamasta.



Kuva 50. CMT30-mittauksen tulokset eri aaltoprofiileilla RH50:ssä ja RH90:ssä

Kuvassa 51 on esitetty CCT30-mittauksen tulokset eri aaltoprofiileilla RH50:ssä ja RH90:ssä. RH50:ssä A-aallolla mittauksen tulokset ovat parempia 2 koepisteessä kuin 1 koepisteessä. Muuten aalloilla B ja C sekä A-aallolla RH90:ssä tulokset ovat 1 koepisteessä korkeammat.

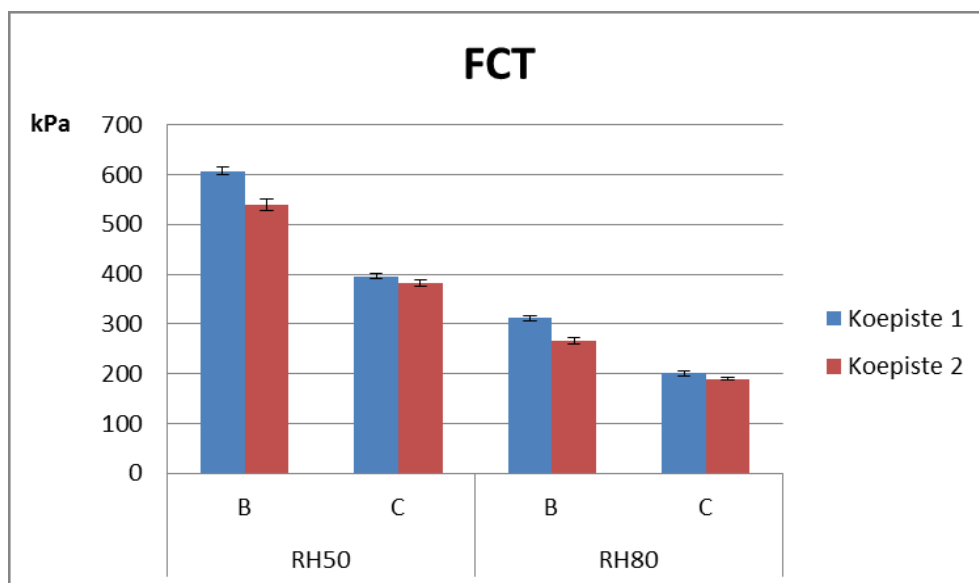


Kuva 51. CCT30-mittauksen tulokset eri aaltoprofiileilla RH50:ssä ja RH90:ssä

A-aallon RH50:ssä korkeammat arvot johtuvat luultavasti 2 koepisteessä esiintyvistä korkeammasta paksuudesta ja näin ollen korkeammasta taivutusjäykkyyydestä. Yleisesti 2 koepisteen arvot ovat heikommat kuin 1 koepisteen. B-aallon arvo on RH50 korkeampi kuin A- tai C-aallon. Tämä voi johtua siitä, että aallot ovat pienempiä eivätkä lommahda niin herkästi. CMT- ja CCT- tulosten numeeriset taulukot ovat liitteessä 14.

8.5.2 Aaltopahvitehtaan mittaukset

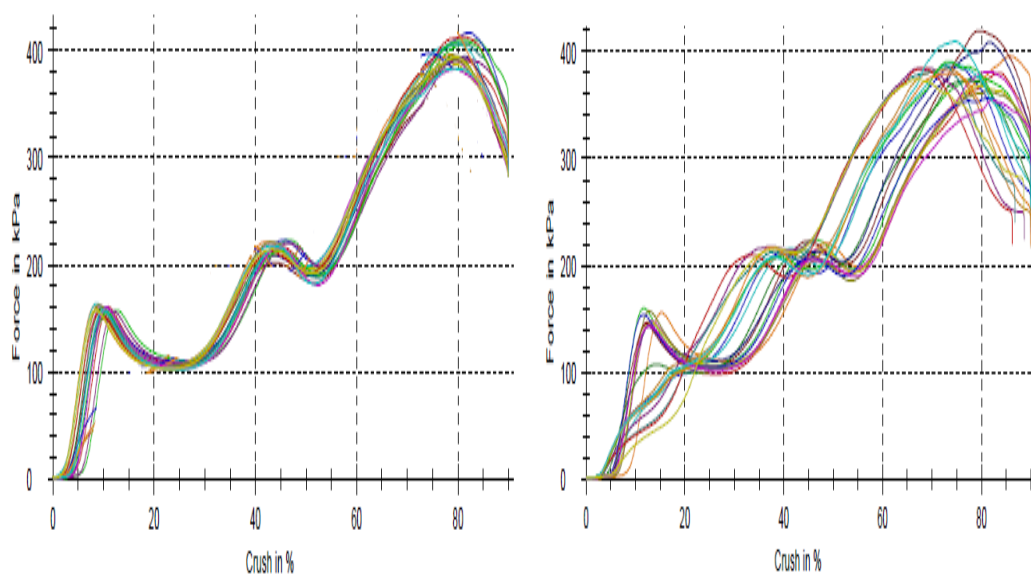
Kuvassa 52 on esitetty matalan neliömassan koeajossa tehdystä aallotuskartongista valmistetun aaltopahvin FCT-mittauksen tulokset B- ja C-aallolla RH50:ssä ja RH80:ssä.



Kuva 52. Aaltopahvin FCT B- ja C-aallolla RH50:ssä ja RH90:ssä

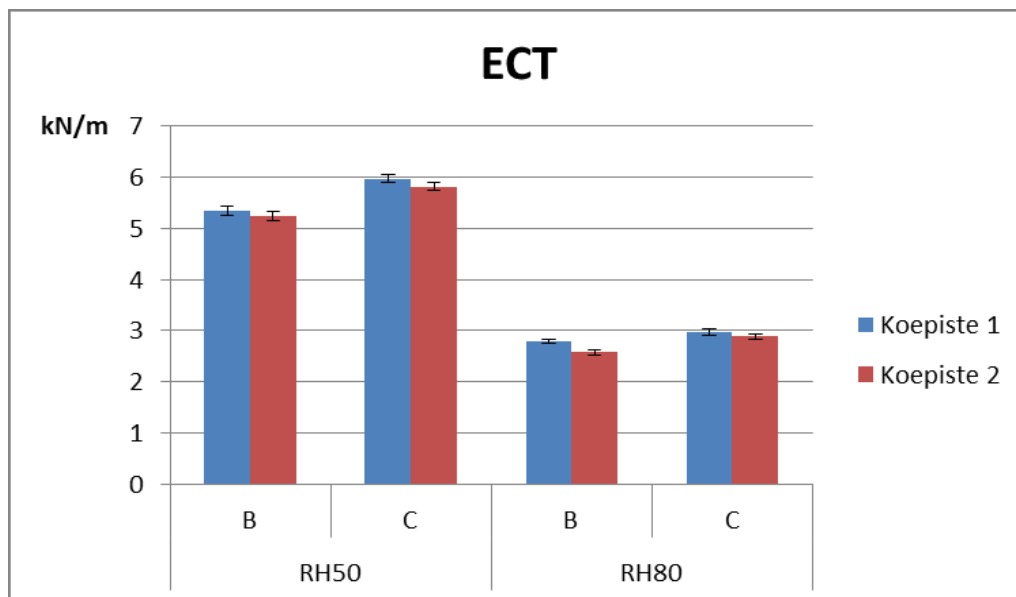
Kuvaajasta nähdään, että samoin kuin aallotuskartongille tehdyissä CMT-mittauksissa myös aaltopahvista mitatun FCT:n tulokset ovat korkeammat B-aallolla kuin C-aallolla. Tämä johtuu siitä, että puristusta vastustavia aallonharjoja B-aallossa on enemmän kuin C-aallossa. B-aallolla 1 ja 2 koepisteen tulosten ero on suurempi kuin C-aallolla. B-aallolla 2 koepisteessä tulokset ovat huonontuneet enemmän kuin C-aallolla. Samanlainen tilanne oli aallotuskartongilla mitatuissa CMT-mittauksissa. Tämä voi johtua luultavasti siitä, että 2 koepisteessä aallotuskartonki on paksumpaa ja taivutusjäykkyys on suurempi. Suuremmalla aallolla korkeampi taivutusjäykkyys vaikuttaa enemmän tuloksiin.

Puristuskäyrien perusteella nähdään selkeämpi ero FCT-mittauksissa 1 ja 2 koepisteiden välillä kuin pelkkää FCT-arvoa tutkimalla. Kuvassa 53 on esitetty RH50:ssä mitatun FCT:n puristuskäyrä C-aaltoprofiililla. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty puristuskäyrä 1. koepisteessä ja oikealla 2. koepisteestä. 1. koepisteessä FCT:n puristuskäyrällä näkyy kolme selkeää huippua. 2. koepisteessä noin puolessa rinnakkaisnäytteistä ensimmäistä huippua eli FCT:n välipistettä ei synny lainkaan. Tästä voi päätellä, että aaltopahvissa oleva aallotuskartonki on heikompaa 2 koepisteessä eikä kestä yhtä paljon rasitusta, vaikka ulkoisesti näyttääkin vaurioitumattomalta. B-aallolla samaa ilmiötä ei syntynyt. Molemmilla koepisteillä FCT:n puristuskäyrällä näkyi myös FCT:n välipiste. Tämä voidaan tulkita niin, että B aallonprofiili kestää paremmin heikennettyä laatua kuin suurempi C aallonprofiili. B-aallon parempi kestävyys voi johtua siitä, että lyhyemmiltä aallon kyljiltä ei vaadita niin paljon taivutusjäykkyyttä. Heikompaa laatua aallotuskartonkissa ei siis vaikuta yhtä paljon B- kuin C-aallolla.



Kuva 53. FCT:n puristuskäyrä RH50:ssä C-aallolla. 1 koepiste vasemmalla ja 2 koepiste oikealla.

Kuvassa 54 on esitetty matalan neliömassan koeajossa tehdystä aallotuskartongista valmistetun aaltopahvin ECT-mittauksen tulokset B- ja C-aallolla RH50:ssä ja RH80:ssä.



Kuva 54. Aaltopahvin ECT B- ja C-aallolla RH50:ssä ja RH80:ssä

Kuvaajasta nähdään, että C-aalto antaa parempia ECT-arvoja molemmissa koepisteissä kuin B-aalto. Ero luultavasti johtuu siitä, että C-aaltoisella aaltopahveilla käytettiin 140 g/m^2 neliömassaisia lainereita ja B-aaltoisilla aaltopahveilla 110 g/m^2 lainereita. Lainereiden taivutusjäykkyydellä on suuri merkitys ECT-lujuuteen. Korkeammassa kosteudessa B- ja C-aallon ero ei ole niin suuri. B-aalto on melkein yhtä hyvä kuin C-aalto RH80:ssä. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että pienemmällä aaltoprofiililla aallotuskartonki ei menetä niin paljon lujuuttaan kuin suurella aaltoprofiililla. 1 ja 2 koepisteen välillä ECT-arvojen perusteella ei ole suurta eroa. Aallotuskartongin laadun heikentäminen näkyy, mutta vähemmän kuin ennen koeajoja oletettiin. Mielenkiintoista on nähdä, että vaikka aaltopahvis-
sa laatuun vaikuttaa aallotuskartongin lisäksi esimerkiksi lainerit, liimat ja ajotilanne aaltopahvikoneella, näkyy aallotuskartonkiin tehdyt erot myös lopputuotteessa.

Aallotuskartonkitehtaalla tehtyjen CCT30-mittausten perusteella ennustettiin, millaiset ECT-arvot koepisteissä 1 ja 2 saavutettaisiin B- ja C-aalloilla. ECT-arvojen ennustamisessa käytettiin Toroin kaavaa (6). Taulukossa 7 on esitetty kaavalla saadut ECT-arvot.

Taulukko 7. Toroin kaavalla (6) lasketut ECT-arvot koepisteistä 1 ja 2. RH50:ssä

	1. koepiste (kN/m)	2. koepiste (kN/m)
A	5,91	6,03
B	5,87	5,73
C	5,81	5,69

Kaavalla 6 laskettuna A-aalto, eli suurin aalto saa suurimman arvon ja C-aallolla tulee pienin arvo. Tämä johtuu siitä, että A aaltoprofiili antaa ECT-kaavaan suurimman aallotuskertoimen ja näin ollen se ennustaa A-aallon olevan lujin rakenne. B-aalto saa suuremman arvon kuin C-aalto, vaikka sen aallotuskerroin on pienempi, sillä B-aallon CCT-arvo on paljon korkeampi. Taulukossa 8 on aaltopahvista mitatut ECT-arvot koepisteistä 1. ja 2.

Taulukko 8. Koepistestä 1 ja 2 mitatut ECT-arvot B- ja C-aallolla RH50:ssä

	1. koepiste (kN/m)	2. koepiste (kN/m)
B	5,34	5,23
C	5,97	5,81

Aaltopahvista mitatuista ECT-arvoista C-aallon arvo on korkeampi, vaikka aallotuskartongilla mitattu CCT oli paljon korkeampi pienemmällä B-aallolla. C-aallon korkeampi ECT-arvo johtuu luultavasti siinä käytetyistä paksummista lainereista. Taulukoiden 7 ja 8 perustella voidaan sanoa, että aallotuskartongin CCT-arvojen perusteella lasketuista ECT-ennusteista A aaltoprofiili antaa harhaanjohtavan ennusteen aaltopahvin lujuudesta. A-aallolla ECT-arvo kasvaa siirryttäessä 1 koepisteestä 2 koepisteeseen, kun mitatuissa tuloksissa arvot laskevat. Pienemmillä aalloilla voidaan siis ennustaa aallotuskartongin tulosten avulla paremmin aaltopahvin ECT-tulokset. Liitteessä 15 on numeeriset taulukot FCT- ja ECT- kuvaajista. Liitteessä 16 on FCT-puristuskäyrät.

8.6 Yhteenveto matalan neliömassan koeajosta

Toisessa vaiheessa kokeellista osaa tavoitteena oli tutkia, miten eri aaltoprofiilit, standardin mukainen A-aaltoa lähellä oleva aalto, B-aalto ja C-aalto vaikuttavat aallotuskartongista saataviin CMT:n ja CCT:n lujuusarvoihin matalilla neliömassoilla ja mikä aaltoprofiili ennustaa parhaiten FCT- ja ECT-arvoja. Aiempien mitausten perusteella tiedettiin, että matalissa neliömassoissa korkeammat CMT- ja CCT-arvot saadaan pienimmällä aaltoprofiililla. Toisessa vaiheessa kokeellista osaa suoritettiin koeajo, missä ensimmäisessä koeajopisteessä oli tehtaalle tavanomaiset ajoarvot ja toisessa ajoarvoja huononnettiin lisäämällä kierrätyskuidun määrää ja vähentämällä massan jauhatusta. Koeajosta saadut aallotuskartongit valmistettiin aaltopahviksi aaltopahvitehtaalla ja niistä mitattiin FCT ja ECT B-aallolla sekä C-aallolla.

CMT:tä mitattaessa molemmissa koeajopisteissä pienin aalto saavutti korkeimmat litistyslujuusarvot ja suurin heikoimmat. CMT-arvoissa kahden koeajopisteen välille ei syntynyt suurta eroa millään aaltoprofiililla. A-aallolla heikennettiin laadulla saavutettiin korkeammat arvot kuin tavanomaisilla ajoarvoilla. Tämä johtui siitä, että massan jauhatusta oli vähennetty, mikä lisäsi kartongin bulkkia ja paksuutta. Tämä paransi taivutusjäykkyyttä, mikä vaikuttaa eniten suurella aallolla. B- ja C-aalloilla arvot huononivat hiukan toisessa koeajopisteessä.

Aaltopahvilta mitatut FCT-arvot seurasivat aallotuskartongin CMT-arvoja. B-aallolla saavutettiin korkeammat arvot molemmissa koeajopisteissä kuin C-aallolla. Tämä johtuu suuremmasta aaltojen määrästä näyteleikkauksissa. Myös toisessa koeajopisteessä aallotuskartongin suurempi paksuus näkyi aaltopahvista tehdyissä mittauksissa. C-aallon arvot laskivat vähemmän 2 koeajopisteessä kuin pienemmän B-aallon.

FCT:n puristuskäyrältä nähtiin C-aallolla huomattava ero 1 ja 2 koeajopisteiden välillä. 1. koepisteessä FCT:n puristuskäyrällä näkyi kolme selkeää huippua. 2. koepisteessä noin puolessa rinnakkaisnäytteistä ensimmäistä huippua eli FCT:n välipistettä ei syntynyt lainkaan. Tästä voi päätellä, että aaltopahvissa oleva aallotuskartonki on heikompaa 2 koepisteessä eikä kestä yhtä paljon rasitusta, vaikka ulkoisesti näyttääkin vaurioitumattomalta eivätkä FCT-arvot laske merkittävästi. B-aallolla samaa ilmiötä ei syntynyt.

CCT-mittauksessa B-aallolla saavutettiin korkeimmat arvot. Tämä johtui siitä, ettei pieni aalto lommahda niin herkästi ja useammat saumakohdat antavat aalloissa enemmän tukea. B-aallon arvot kuitenkin tippuivat enemmän kuin C-aallon, sillä suurempi aalto hyötyi enemmän kasvaneesta taivutusjäykkyydestä. A-aallolla 2 koeajopiste saavutti jopa korkeammat arvot kuin 1 koeajopiste.

ECT-arvoissa C-aallolla saavutettiin korkeammat arvot kuin B-aallolla, vaikka B-aalto oli CCT-arvojen perusteella lujempi. Tämä johtui C-aallossa käytetyistä paksummista lainereista, lujuus vaikuttaa erittäin paljon ECT-arvoon. Korkeamassa kosteudessa tehdyissä mittauksissa B-aallon arvot eivät tippuneet yhtä paljon kuin C-aallon. Eli pienemmällä aallolla aaltopahvi kestää paremmin kosteuden tuomaa heikentymistä lujuuksissa.

Lopuksi verrattiin eri aaltoprofiileilla kaavalla 6. ennustettuja ECT arvoja ja mitattuja tuloksia. A-aallolla mitatut CCT-arvot ennustivat heikoiten todellista laatua. Niissä ECT oli 2 koeajopisteessä korkeampi kuin 1 koeajopisteessä. B- ja C-aallolla tulokset laskivat siirryttäessä 1 koeajopisteestä 2 koeajopisteeseen samoin kuin todellisissa mitatuissa ECT-arvoissa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Kokeellisen osan mittaustulosten perusteella voidaan vahvistaa kokeellisen osa ensimmäisen vaiheen hypoteesi. Tulokset selvästi näyttivät, että matalilla neliö-massoilla sekä CCT- että CMT-arvot ovat korkeammat pienimmällä aallolla eli B-aallolla mitattuna. CCT-mittauksessa ero näkyy vain matalilla neliömassoilla. CMT-mittauksen arvot taas ovat korkeammat kaikilla neliömassoilla pienemmillä aaltoprofiileilla. Matalissa neliömassoissa ilmiö korostui selvästi. Ohuen aallotus-kartongin taipumus lommahtaa suurella A-aallolla vaikuttaa merkittävästi tulok-siin, joita sillä mitataan. Standardin mukainen melkein A-aalto siis johtaa harhaan, kun sillä aallotettuja matalaneliömassaisia aallotuskartonkeja mitataan. Loppu-tuotteessa aaltojen lommahdusta ei tapahdu, sillä aaltopahvitehtaassa ohuita kar-tonkeja aallotetaan pienillä aalloilla.

Kokeellisen osan toisen vaiheen koeajon perusteella havaittiin selkeästi, että A-aallolla mitatuilla CCT-tuloksilla ennustettiin heikoiten ECT-mittausten tulos. Tämän perusteella ohuiden aallotuskartonkien CCT ja CMT kannattaa mitata myös B-aallolla eikä luottaa A-aallolla laskettuihin ECT-tuloksiin. B-aallon tulok-set eivät myöskään kärsineet yhtä paljon korkean kosteuden vaikutuksesta tai nii-den FCT:n puristuskäyrät eivät reagoineet heikennettyyn laatuun niin kuin C-aallolla.

Suosittelen, että tulevaisuudessa aallotuskartonkitehtaalla mitataan CCT:ssä ja CMT:ssä matalilla neliömassoilla standardin mukaisen melkein A-aallon lisäksi myös B-aallolla aallotetut näyteliuskat. Mittausdataa tulisi saada useamman kuu-kauden ajalta, jotta tuloksille saadaan tilastollista luotettavuutta. Kun asiakkaalle on tarjota standardin mukaisen mittauksen lisäksi lopputuotetta paremmin vastaa-via mittaustuloksia, siirrytään lähemmäs asiakaslähtöistä työskentelyä.

Lisäksi tekisin uudestaan aaltopahvitehtaalla ajetun koeajon. Uudessa koeajossa käyttäisin sekä B- että C-aallolla samaa laineria, jotta aaltoprofilien erot näkyisi-vät selvemmin eivätkä lainerien ominaisuudet vaikuttaisi tuloksiin.

Aallotuskartongin lujuuksien perusteella aaltopahvin lujuuden ennustamista hel-pottaisi työssä tutkitun CMT:n välipisteen määrittäminen. Välipisteiden arvojen hajonnat ovat huomattavasti pienemmät kuin CMT:n arvojen. Välipiste tuntemalla

saataisiin laajemminkin tietoa siitä, miten paljon aaltopahvin valmistaja voi rasittaa aaltopahvia jalostuksen aikana ilman että se menettää litistyslujuudenkestoja.

FCT:n puristuskäyrän perusteella koeajopisteessä 2, suosittelen, ettei aallotuskartonkitehdas lisää kierrätyskuidun määrää massan seassa. FCT:n puristuskäyrän välipisteen huippu hävisi ja hajonnan määrä mittauksessa kasvoi erittäin paljon, kun massassa oli 10 % kierrätyskuitua ja jauhatusta oli vähennettiin koeajon aikana.

Lisäksi kokeellisen osan perusteella tuli selväksi, että aallotuskartonkitehtaan laboratoriossa on monia huomioitavia asioita. RH90:ssä mitatuista näytteistä kosteus ehtii hävitä, kun mitataan yhdessä mittapisteessä 10 rinnakkaisnäytettä. Tämän lisäksi kartonkikoneen poikkiradasta jätetään mittaamatta reunimmaisat poikkiratapaikat. Näiden huomioitavien asioiden lisäksi poistaisin käytöstä CMT0-mittauksen. CMT0:n arvo on noin 30 % korkeampi kaikilla neliömassoilla kuin CMT30-arvo. Tämän perusteella mittausta voisi käyttää suuntaa-antavana laadun seurantamittarina, mutta Boxplot-kuvaajan perusteella arvot eivät ole luotettavia ja hajonta on todella suurta.

10 LÄHTEET

1. Laakso, O. & Rintamäki, T. Aaltopahvin valmistus ja jalostus. Suomen Aaltopahviyhdistys ry. 2. painos. Gummerus Kirjapaino. Jyväskylä, 2003. 152 s.
2. Kirwan, M., Dekker, A. Corrugated fibreboard packaging. Paper and paperboard packaging technology. 2. painos. Blackwell Publishing Ltd. 2008 s. 456
3. Savolainen, A. Papermaking Science and Technology vol 12, Paper and paperboard converting. 1. painos. Toim. A. Savolainen. Julk. Fabet Oy. Jyväskylä. 1998. 283 s.
4. Forum Wellpappe Austria. Wellpappe Austria homepage [online]. [viitattu 30.11.2014]. Corrugated board grades.
Saatavissa: <http://www.wellpappe.at/en/corrugated-board/production/corrugated-board-in-detail/corrugated-board-grades>
5. Toroi, M. Aaltopahvi ja sen valmistus. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 1043 Kartonki 135. Espoo 1971. 25 s. + liitteet.
6. Kainulainen, M. & Toroi, M. Aaltopahvin komponenttien vaikutus laatikon puristuslujuuteen. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 1705. Espoo 1986. 21 s. + liitteet.
7. Olsson, L. More liner or more fluting? International paperboard industry. 1986. s. 26-28
8. Niskanen, K. Papermaking Science and Technology vol 16, Paper physics. 1. painos. Toim. Niskanen, K. Julk. Fabet Oy. Jyväskylä. 1998. 322 s.
9. Morgan, D. G. Analysis of creep failure of corrugated board in changing or cyclic humidity regimes. 59th Appita Annual Conference and Exhibition: Incorporating the 13th ISWFPC. Auckland, Uusi-Seelanti. 16-19 toukokuuta, 2005. Appita Inc. 2005.
10. Gustafsson, J. Pulping. Chemical pulping part 1, Fibre chemistry and technology, Papermaking science and technology. 2. painos. Toim. Farding P. Julk. Paperi ja puu Oy. Porvoo. 2011. s. 190-381
11. Markström, H. Testing methods and instruments for corrugated boards. Lorentzen & Wettre. Kista, Ruotsi. 1999. 104 s.

12. Sorensen, G., Hoffman, J. Moisture sorption in moulded fibre trays and effect on static compression strength. *Packaging technology and science* 16(2003). s 159-169
13. Niskanen, K. *Papermaking Science and Technology vol 16, Paper physics*. 1. painos. Toim. Niskanen, K. Julk. Fabet Oy. Jyväskylä. 1998. 322 s.
14. Toroi, M. Komponenttien vaikutus aaltopahvin lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 821 Kartonki 95. Espoo 1967. 12 s. + liitteet.
15. Morgan, D. G. Analysis of creep failure of corrugated board in changing or cyclic humidity regimes. 59th Appita Annual Conference and Exhibition: Incorporating the 13th ISWFPC. Auckland, Uusi-Seelanti. 16-19 toukokuuta, 2005. Appita Inc. 2005
16. Aboura, Z., Talbi, N., Alloui, S. & Benzeggagh, M. Elastic behavior of corrugated cardboard: experiment and modelling. *Composite structures*. 63(2004). s. 53 – 62.
17. Toroi, M & Pekkala. Oy Keskuslaboratorio – Centrallaboratorium Ab. Seloste 866. Espoo 1984. 27 s. + liitteet
18. Toroi, M. Kartongin jäykkyys. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 1327. Espoo 1978. 21 s. + liitteet.
19. Levlin, J-E. *Papermaking Science and Technology vol 17, Pulp and paper testing*. 1. painos. Toim. J-E. Levlin & L. Söderhjelm. Julk. Fabet Oy. Jyväskylä. 1999. 283 s.
20. Stockmann, V. Measurement of intrinsic compressive strength of paper. *Tappi*. 59(1976):7. s. 93-97.
21. Cavlin, S. & Fellers, C. A new method for measuring the edgewise compression properties of paper. *Svensk Papperstidning*. 1975:9. s. 329-332.
22. Bernard, E. & Bouchayer, H. Production parameters affecting the properties of corrugating papers. *Rev ATIP* 29(1975):4. s. 113-132.
23. Frank, B. Revisiting paper strength measurements for estimating combined board strength. *Tappi Journal*. 6(2007):9. s. 10-17.

24. Jonson, G. & Ponton, S. Utilizing liner/medium weight in corrugated board for best box performance. *Boxboard containers*. 92(1985):11. s. 23-25
25. Kainulainen, M. & Toroi, M. Optimum composition of corrugated board with regard to the compression resistance of boxes. *Paperi ja Puu*. 9(1976):. s. 666-668.
26. ISO 7263. Corrugating medium – Determination of the flat crush resistance after laboratory fluting. Sveitsi: International standard. 2011. 8 s.
27. Brüker, D. Einfluss des klebstoffs auf den flachstauchdruck von wellpappe. *Papier-Rundschau*. 22(1963):. s. 1271.
28. Crisp, C.J., Stott, R.A. & Tomlinson, J.C. Resistance of corrugated board to flat crushing loads. 51(1968):5. s. 80A-83A.
29. Kolhonen, E. & Toroi, M. Flutingin CMT:n ja neliömassan vaikutus aaltopahvin paksuuden säilymiseen eri rasiustilanteissa. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. KCL seloste 2008. Espoo 1991. 14 s. + liitteet.
30. Toroi, M. Concora medium test- ja flat crush-arvon riippuvuussuhde. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 708 Kartonki 82. Espoo 1965. 6 s. + liitteet.
31. Markström, H. Testing methods and instrument for corrugated board. Lorentzen & Wettre. Tukholma 1988. 76 s.
32. Batelka, J. The effect of boxplant operations on corrugated board edge crush test. *Tappi Journal*. 77(1994):4. s. 193-199.
33. Toroi, M. Aaltopahvilaatikoiden puristuslujuusanalyysi. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 786 Kartonki 92. Espoo 1966. 17 s. + liitteet.
34. Toroi, M. , Kainulainen, M. Aaltopahvin laskentamallit. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 1942. Espoo 1990. 11 s. + liitteet.
35. Johnson, G. & Ponton, S. Utilizing liner/medium weight in corrugated board for best box performance. *Boxboard Containers*. 98(1985):11. s. 23-25.
36. Urbanik, T.J. Correcting for instrumentation with corrugated fiberboard edgewise crush test theory. *Tappi Journal*. 94(1990):. s. 263-268.

37. Kolhonen, E. , Toroi, M. & Harala, E. Aaltopahvin litistys- ja lävistyslujuus-analyysi. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 1307. Espoo 1977. 19 s. + liitteet.
38. Popil, R.E. Shear measurement of board crushing effect. Paperboard Packaging. 92(2007):37. s. 1-15.
39. Peterson, W. S. Minimum cost design for corrugated container under top to bottom compression. Tappi. 63(1980):2. s. 143-146.
40. Levlin, J.E. Kartongin jäykkyys. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Kirjallisuuskatsaus 129. Espoo 1967. 61 s. + liitteet.
41. Toroi, M. & Rosenberg, L. Oy Keskuslaboratorio – Centrallaboratorium Ab. Seloste 980. Espoo 1970. 40 s.
42. Toroi, M. Kartongin jäykkyys. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. Seloste 1327. Espoo 1978. 21 s. + liitteet.
43. Popil, R.E., Coffin, D.W & Habeger, C.C. Transverse shear measurement for corrugated board and its significance. Appita Journal. 61(2008):4. s. 307-312.
44. Chalmers, I. MD shear stiffness in the corrugated board industry. Esite. KoruTest Limited. 2008. 40 s.
45. Jonson, G. & Ponton, S. Utilizing liner/medium weight in corrugated board for best box performance. Boxboard containers. 92(1985):11. s. 23-25
46. McKeen, R., Grandner, J. & Wachuta, J. Compression strength formula for corrugated boxes. Paperboard Packaging. 48(1963):8. s. 149-159.
47. Pat. Us. 6,800,052 B1. Corrugating machine and corrugating roll design for the same. (Abe, E.). App. 09/636,145, 2000-8-10. 7 s.
48. Whitsitt, W.J. Runnability and corrugating medium properties. Tappi Journal. 170(1987):10. s. 99-103.
49. Pat. Us. 6,800,052 B1. Corrugating machine and corrugating roll design for the same. (Abe, E.). App. 09/636,145, 2000-8-10. 7 s.

50. Toroi, M. & Kolhonen, E. Runnability of fluting. Pulp & Paper Canada. 77(1976):10. s. 65-68.
51. Whitsitt, W.J. & Sprague, C.H. Compressive strength retention during fluting medium: Strength losses in fluting. Tappi Journal. 70(1987):2. s. 91-96.
52. McKee, R.C. & Grander, J.W. Properties of corrugating medium which influence runnability. Tappi. 50(1967):7. s. 35A-40A.
53. Kajanto, I. & Heinonen, J. Laskentamenetelmien kehittäminen kartonkituotteiden lujuusanalyysiin. Oy Keskuslaboratorio Centrallaboratorium Ab. KCL seloste 2328. Espoo 1997. 47 s. + liitteet.
54. Cousin, S. Are there big shifts coming in lightweight fluting?. Risi info tech channel. [artikkeli]. 2013:10 [viitattu 14.4.2014]. Saatavissa: <http://www.risiinfo.com/techchannels/papermaking/Are-there-big-shifts-coming-in-lightweight-fluting.html>
55. Allanson, A. & Vård, B. Stability and collapse of corrugating board; Numerical and experimental analysis. Väitöskirja. Lund Universitet. Structural Mechanics. Lund 2001. 62 s.
56. Jopson, R. Microflutes – Evolution or revolution. Metso Paper Technology-Days 2003. Lahti, Suomi. Kesäkuu 10-12, 2003.
57. Urbanik, T.J. Effect of corrugated flute shape on fibreboard edgewise crush strength and bending stiffness. Journal of Pulp and Paper Science. 27(2001):10. s. 330-335.
58. Komiyama, Y. , Kon, W. , Nagasawa, S. & Fukuzawa, Y. Effect of structural shape of corrugated medium on flat crush characteristics of corrugated fiberboard. Journal of the Chinese society of mechanical engineers. 34(2013):4. s. 361-369.
59. Waterhouse, J.F. Effect of synthetic fiber and binder addition on the strength losses associated with corrugating medium. Materials Research Society Symposium. San Fransisco, CA. April 19, 1990. Institute of Paper Science and Technology. Atlanta. 1990. s. 1-18.
60. Pat. US. 5,626,709. Single facer corrugating roll flute contour. (Keeny, R.). App. 340,098. 1994-11-15. 7 s.

61. Chow, D.K. Design of cost-effective flute features in corrugating medium. Tappi Journal. 69(1986):10. s. 126-128.
62. Budmir, I., Lajic, B. & Preprotic, S. Evaluation of mechanical strength of five layer corrugated cardboard depending on waveform types. Acta Graphica. 23(2012):3-4. s. 111-120.

11 LIITTEET

Liite 1	Aallotuskartongin ja aaltopahvin testauksen standardeja ja menetelmiä
Liite 2	CMT-mittauksen näytteenvalmistelukammat
Liite 3	Aallotuskartongin CCT-mittausten tulokset kuvaajina neliömassan mukaan
Liite 4	Aallotuskartongin CMT-mittausten tulokset kuvaajina neliömassan mukaan
Liite 5	CMT- ja CCT-mittausten hajonnat Newtonina neliömassan mukaan
Liite 6	CMT- ja CCT-mittausten hajonnat Newtonina näytearkin paikan mukaan
Liite 7	CMT- ja CCT-mittausten puristuslujuusprofiilit kartonkikoneen radalla
Liite 8	Kartonkikoneen kuituorientaatio näytteenotto hetkinä
Liite 9	CMT:n välipiste ja maksimipiste
Liite 10	CMT0-, CMT30- ja SCT-mittausten laboratorion mittaamat keskiarvot
Liite 11	CCT15-, CCT30- ja SCT-mittausten laboratorion mittaamat keskiarvot
Liite 12	CMT30- ja CCT30-mittausten arvot RH90:ssä
Liite 13	Matalan neliömassan koeajon suunnitelma
Liite 14	Matalan neliömassa koeajon tulokset aallotuskartonkitehtaalla
Liite 15	Matalan neliömassan koeajon tulokset aaltopahvitehtaalla
Liite 16	FCT-puristuskuvaajat

Aallotuskartongin ja aaltopahvin testauksen standardeja ja menetelmiä

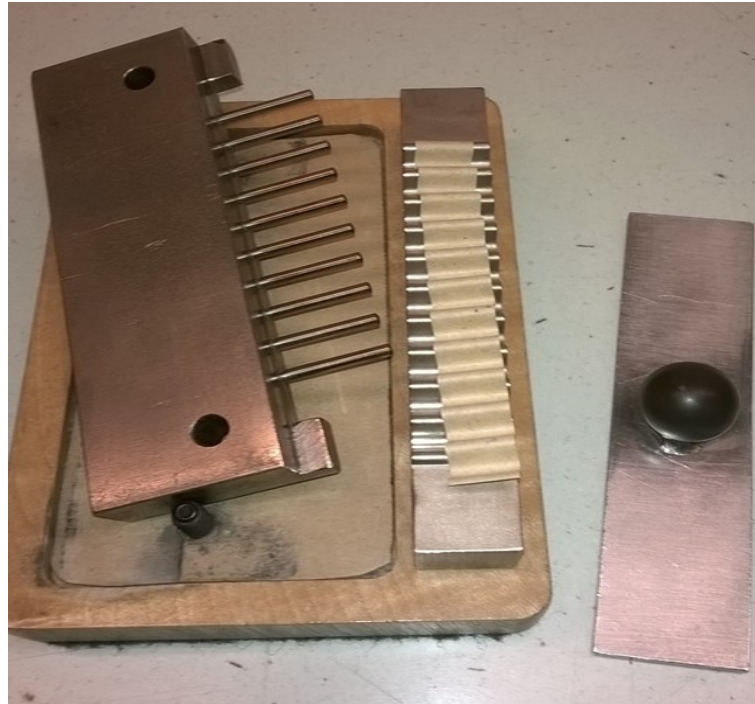
Taulukko 1. Aallotuskartongin ja aaltopahvin testauksen standardeja ja menetelmiä. [1]

TESTI	FEFCO	TAPPI	ISO	EN	SCAN
Ilmanläpäisevyys, Gurley		T 460	5636-5		P 19
Ilmastointi, normaaliolosuhteet		T402	187	20187	P 2
Ilmastointi, normaaliolosuhteet, pakkaukset	TM 51-55		2233	2233	
Kitka, aaltopahvi	R 104	T 815 T 816	15359		
Kitka, kartonki			15359		
Kosteus		T 412	287	20287	P 4
Laatikon pudotus	TM 51	T 802	2248		
Laatikon puristuslujuus, BCT	TM 50	T 804	12048	12048	
Laatikon sivuliitosten lujuus	TM 55	T 813 T 840			
Laatikon tärytys	TM 52	T 817	2247	2247	
Laatikon törmäys	TM 53	T 801	2244	2244	
Lävistyslujuus	TM 5	T 803	3036		P 23
Liimasauman lujuus, PAT	TM 11	T 821			
Liimasauman märkälujuus	TM 9	T 812 T 821 T 842	3038		
Litistyslujuus, lab aallotettu aallotuskartonki, CMT		T 809	7263	7263	P 27
Litistyslujuus, aaltopahvi, FCT	TM 6	T 808	3035	23035	P 32
Litistyslujuus kartonki, SCT		T 826	9895		P 46
Näytteenotto	TM 1	T 400	186	186	P 1
Neliömassa, aaltopahvi	TM 2	T 410	536	536	
Neliömassa, aaltopahvin komponenteista	TM 10		3039		
Neliömassa, kartonki		T 410	536	536	P 6
Paksuus, aaltopahvi	TM 3	T 411	3034		P 31
Paksuus, kartonki		T 411	534	20534	P 7
Puhkaisulujuus, aaltopahvi	TM 4	T 810	2759		P 25
Puhkaisulujuus, kartonki		T 807	2759		P 25
Rengaslitistyslujuus, RCT		T 818 T 822	12192		P 34

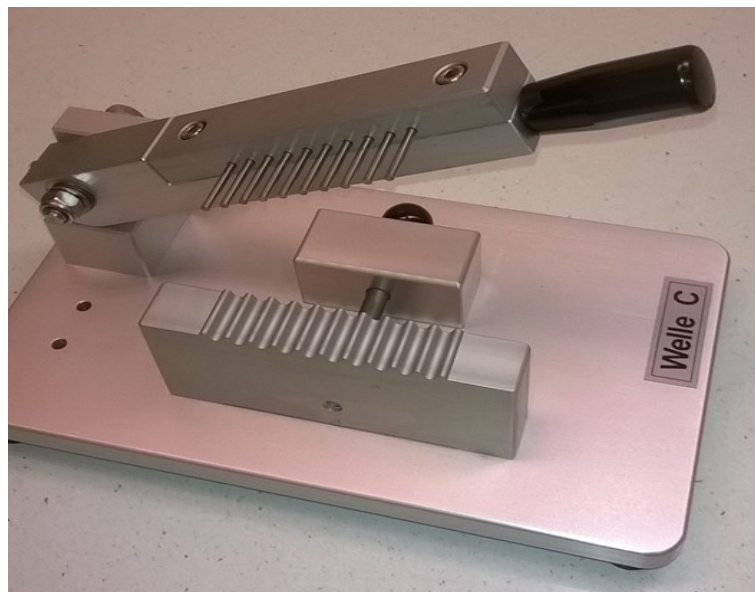
LIITE 1 2/2

Reunanlitistyslujuus, aaltopahvi, ECT	TM 8	T 811 T 838 T 839	3037 13821	3037	P 33
Taivutusjäykkyys, nelipistemenetelmä		T 820 T 836	5628		P 65
Vesiabsorptiokyky, Cobb-menetelmä	TM 7	T 441	535	20535	P 12

CMT-mittauksen näytteenvalmistelukammat

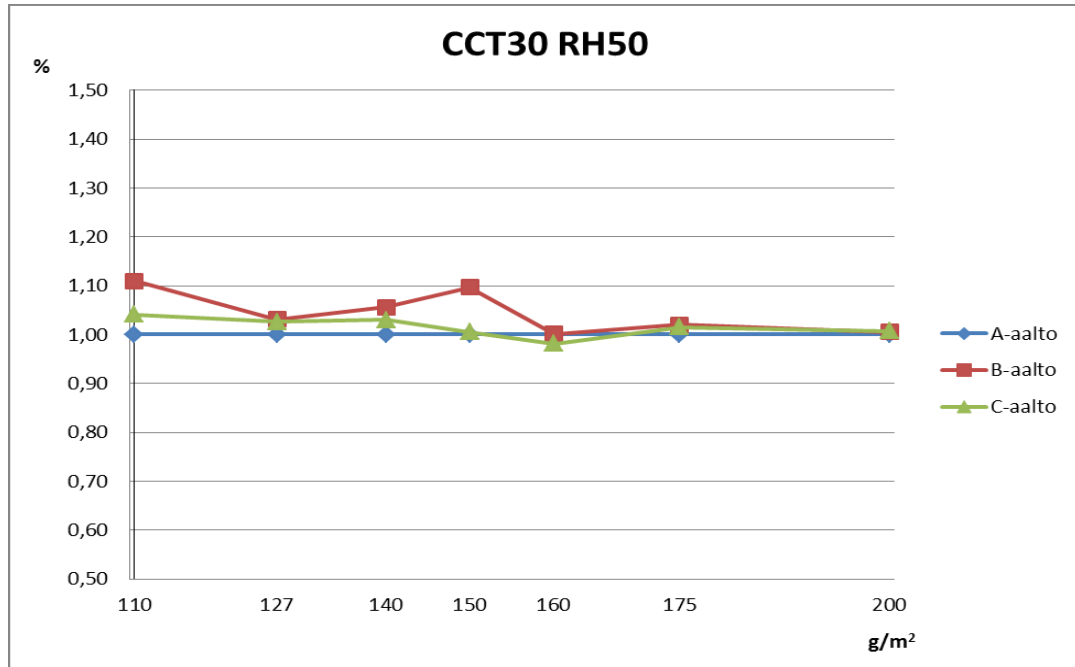


Kuva 1. CMT-mittauksen näytteenvalmistelukampa A-aallolle

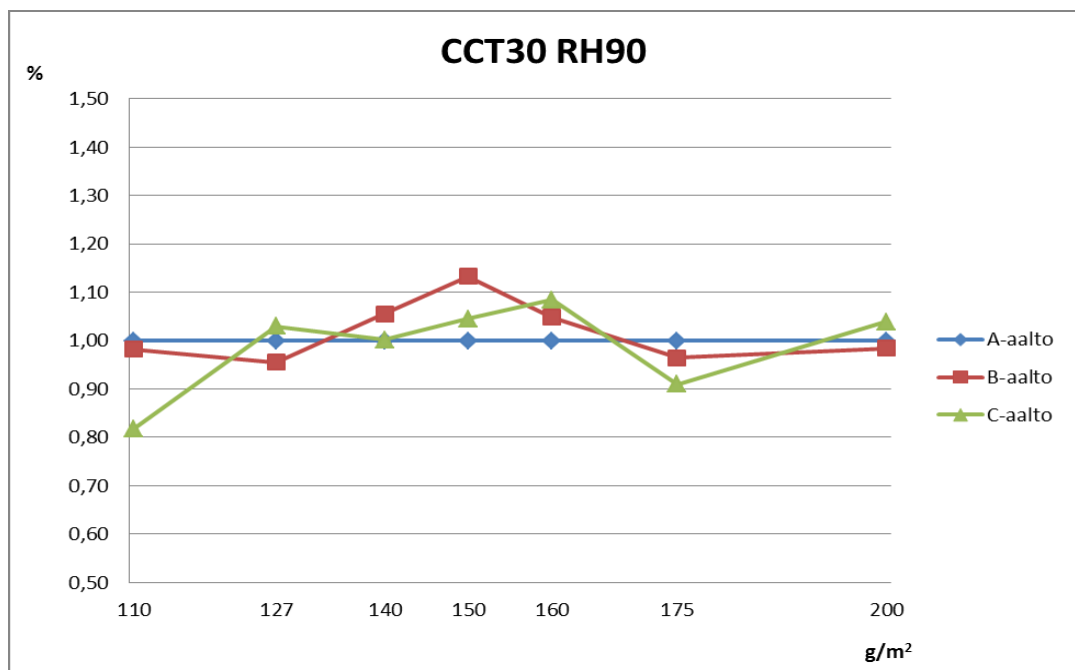


Kuva 2. CMT-mittauksen näytteenvalmistelukampa C-aallolle

**Aallotuskartongin CCT-mittausten tulokset kuvaajina neliömas-
san mukaan**

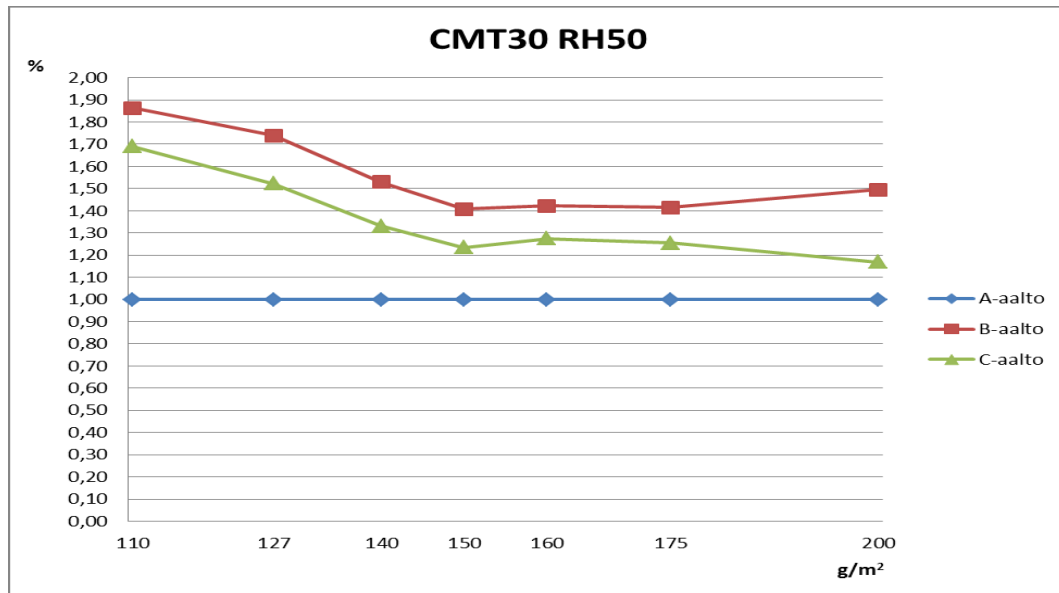


Kuva 3. CCT30-mittausten tulokset A-aallon keskiarvolla jaettuna RH50:ssä

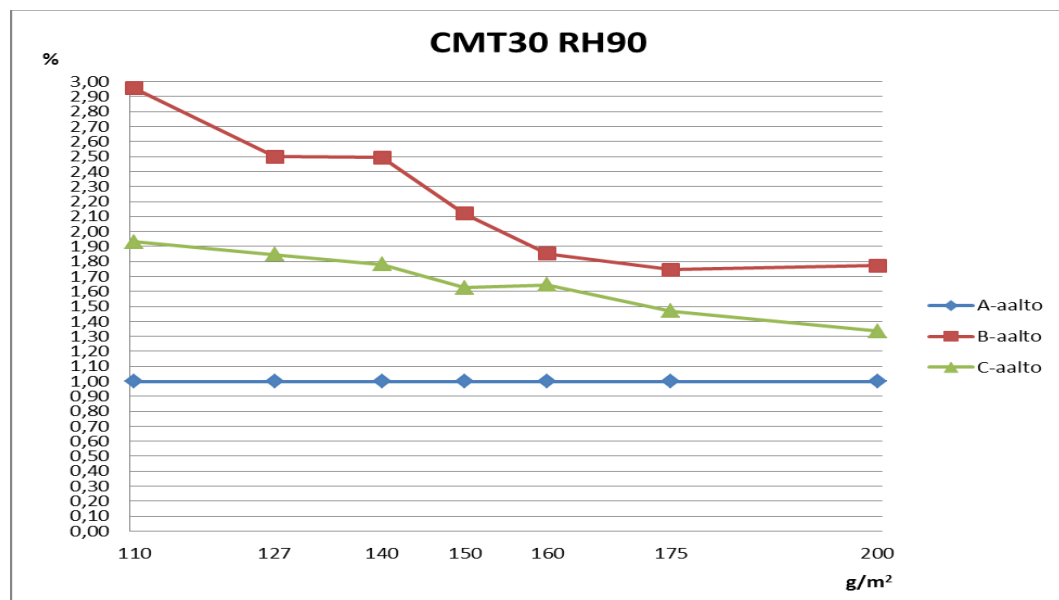


Kuva 4. CCT30-mittausten tulokset A-aallon keskiarvolla jaettuna RH90:ssä

Aallotuskartongin CMT-mittausten tulokset kuvaajina neliömas- san mukaan

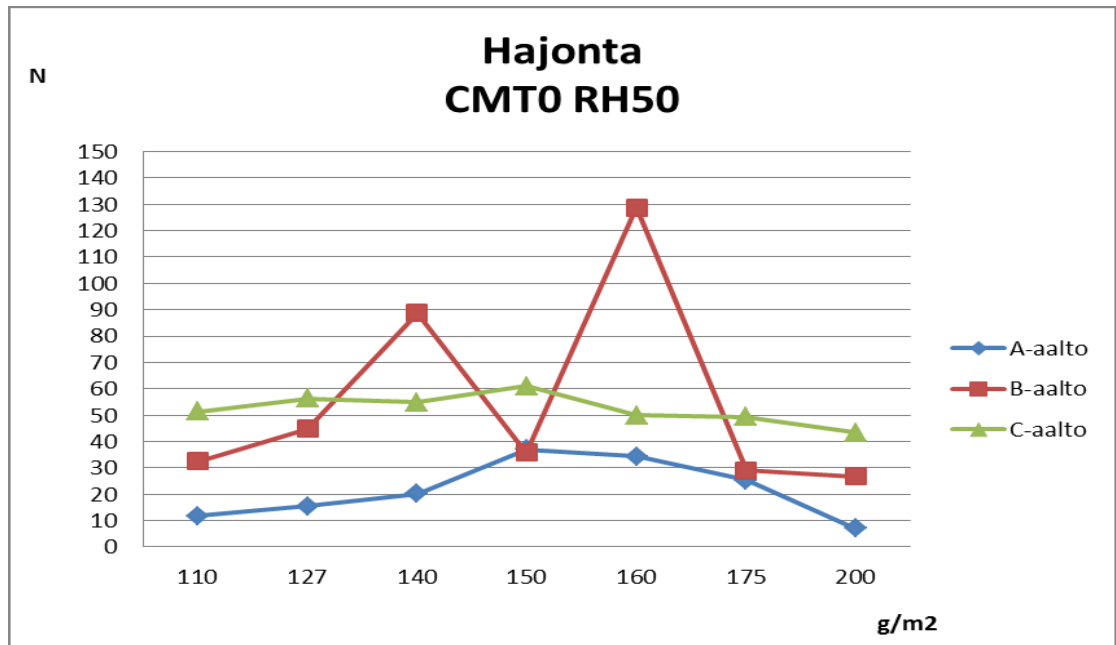


Kuva 5. CMT30-mittausten tulokset A-aallon keskiarvolla jaettuna RH50:ssä

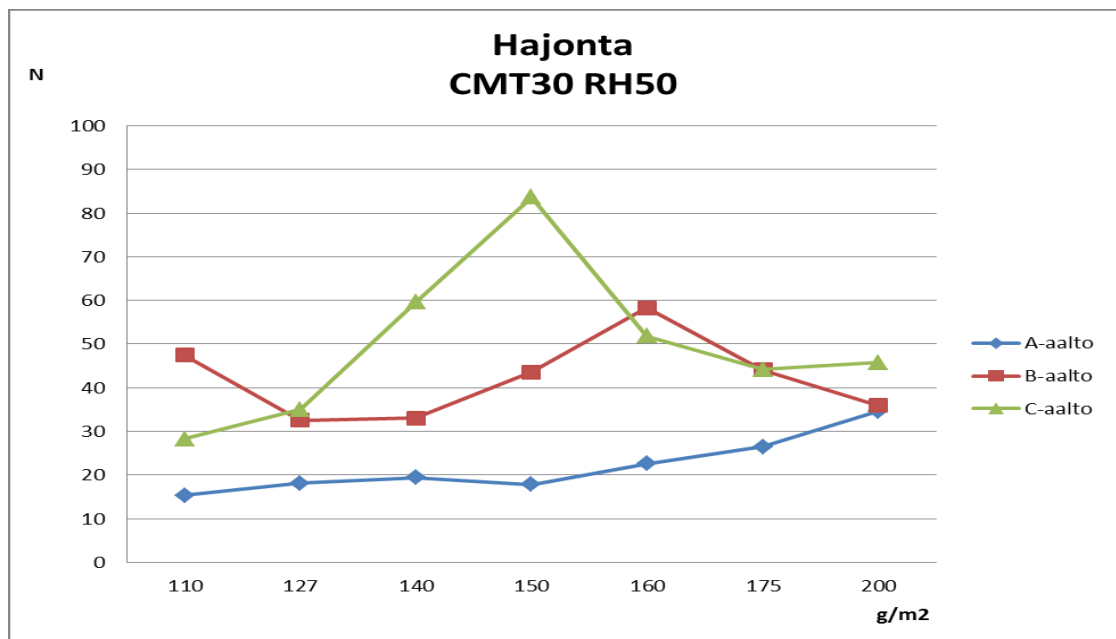


Kuva 6. CMT30-mittausten tulokset A-aallon keskiarvolla jaettuna RH90:ssä

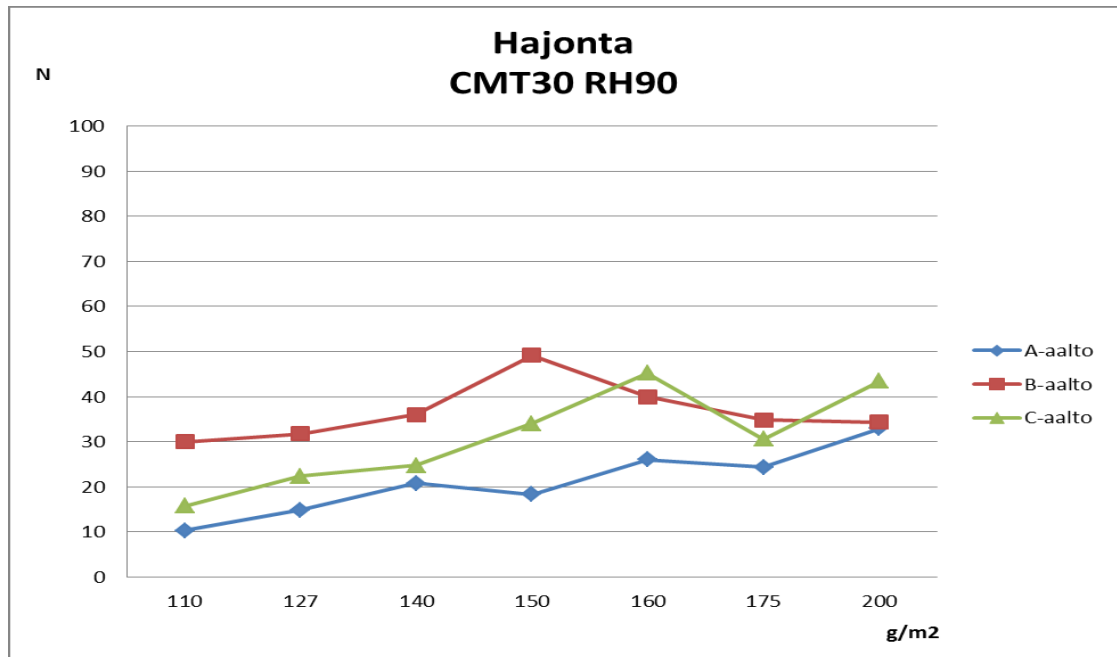
CMT- ja CCT-mittausten hajonnat (N) neliömassan mukaan



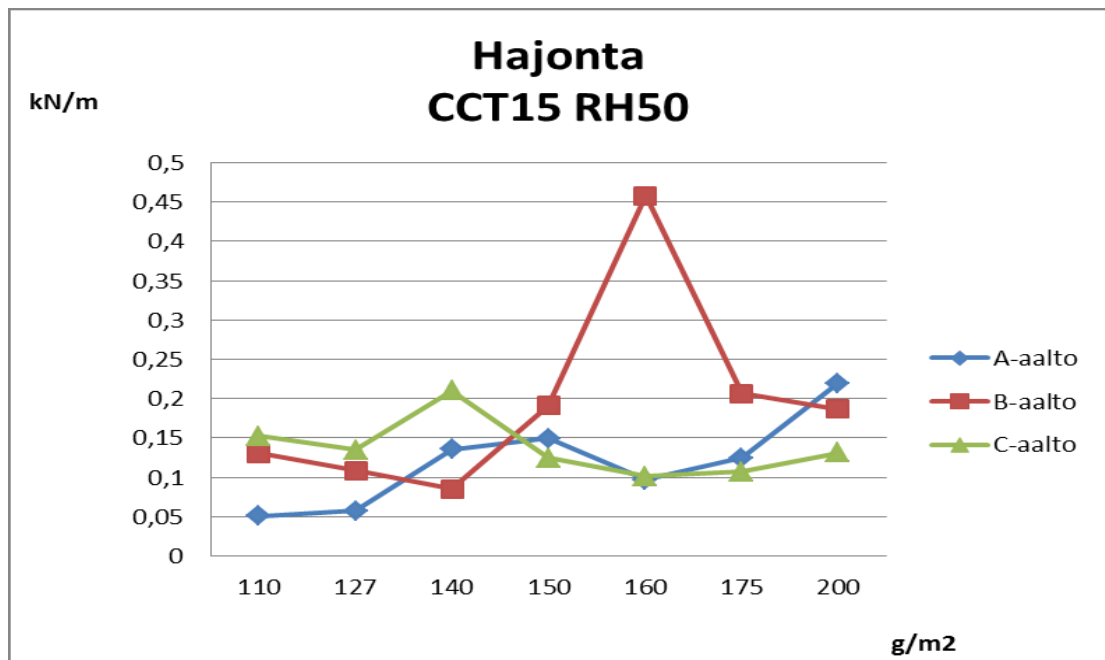
Kuva 7. CMT0- mittausten hajonnat eri aaltoprofiileilla neliömassoittain



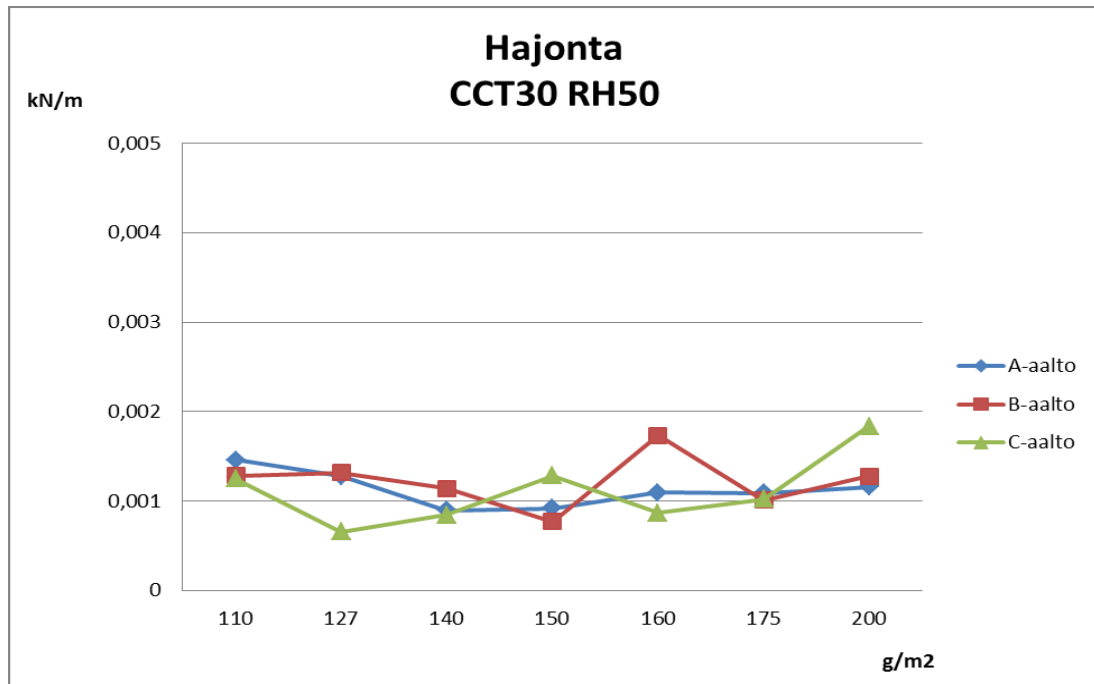
Kuva 8. CMT30- mittausten hajonnat eri aaltoprofiileilla neliömassoittain



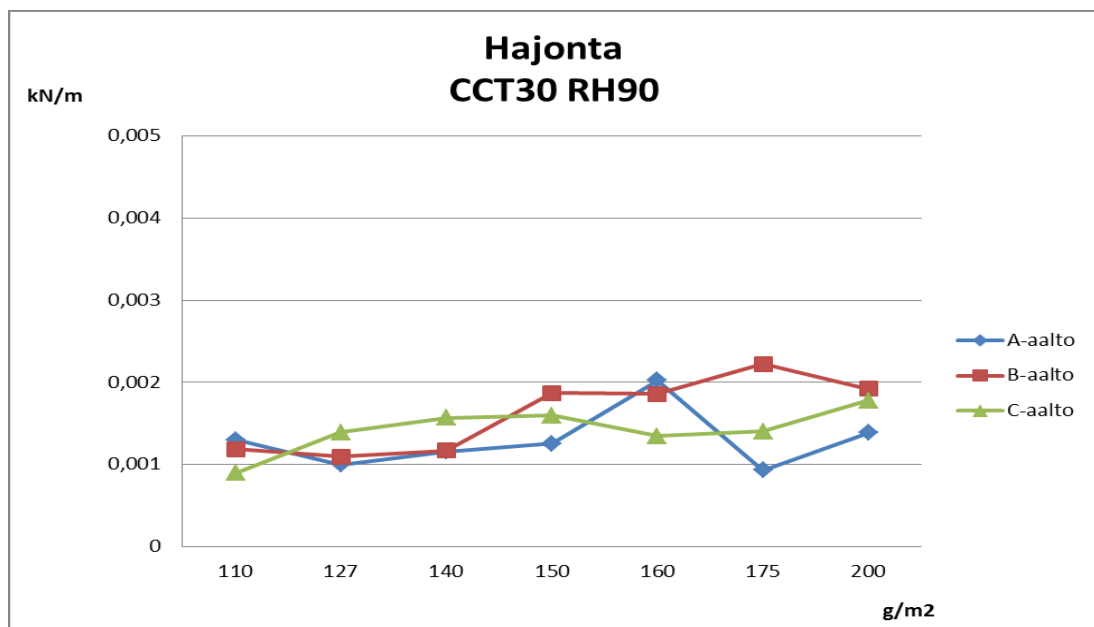
Kuva 9. CMT30- mittausten hajonnat eri aaltoprofileilla neliömassoittain RH90:ssä



Kuva 10. CCT15- mittausten hajonnat eri aaltoprofileilla neliömassoittain

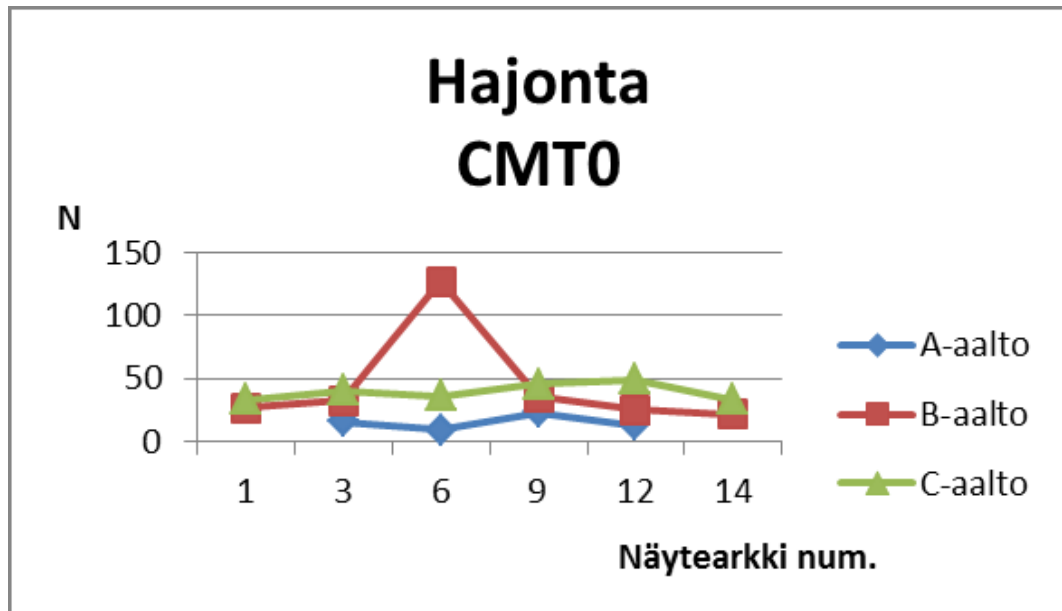


Kuva 11. CCT30- mittausten hajonnat eri aaltoprofileilla neliömassoittain

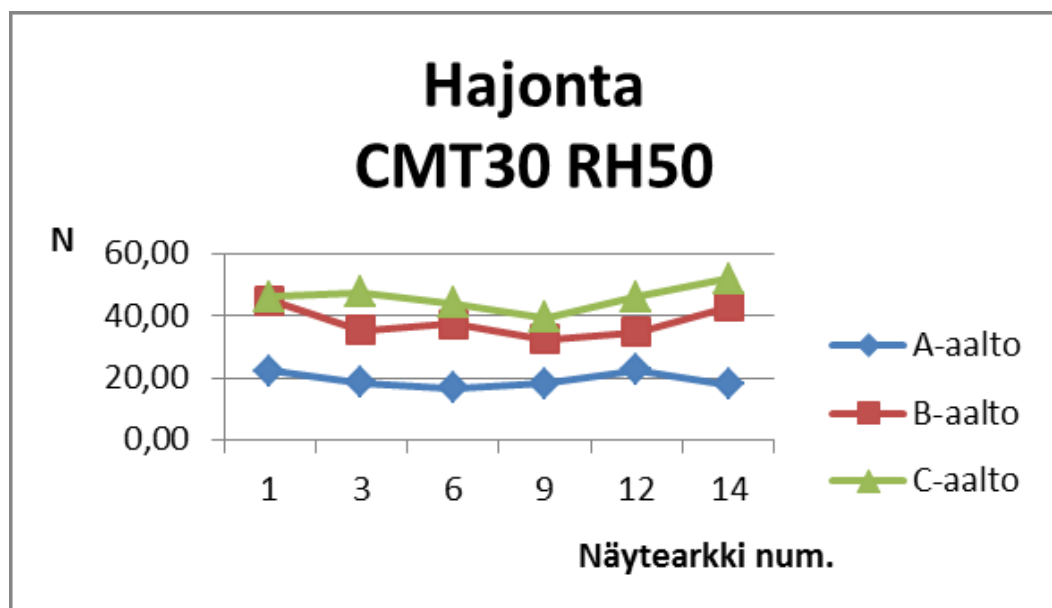


Kuva 12. CCT30- mittausten hajonnat eri aaltoprofileilla neliömassoittain RH90:ssä

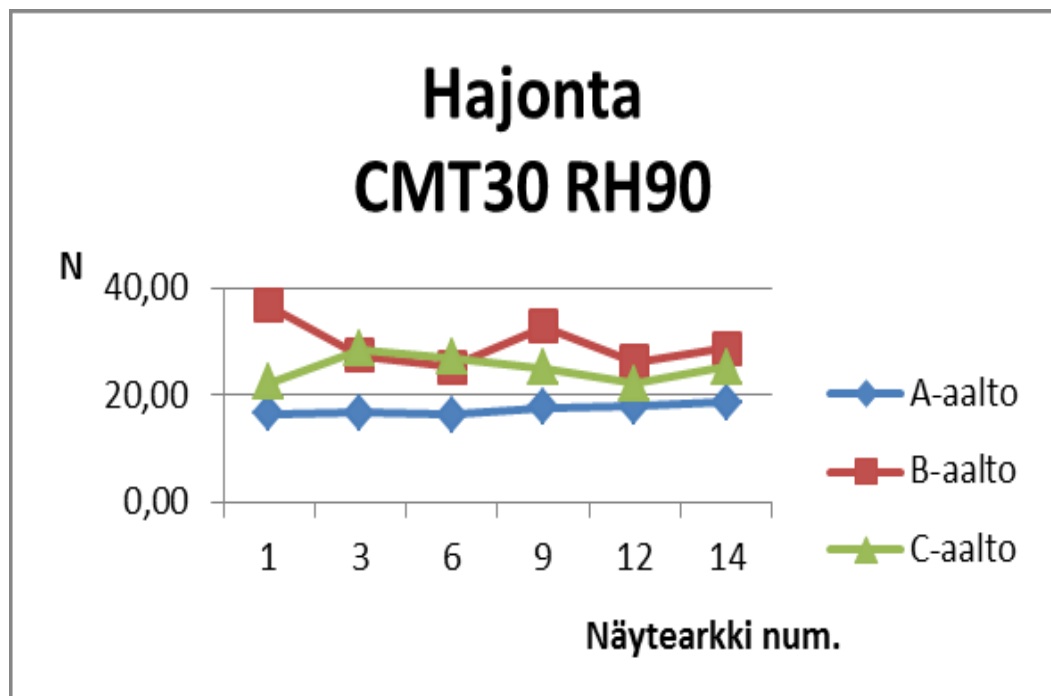
CMT- ja CCT-mittausten hajonnat (N) näytearkin paikan mukaan



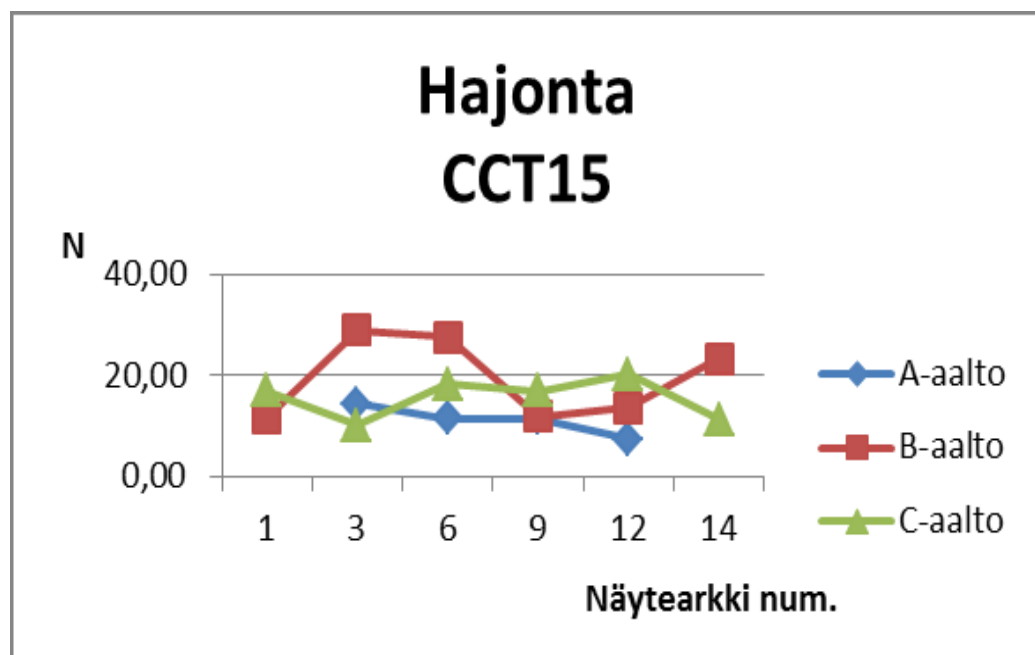
Kuva 13. CMT0-mittausten hajonnat näytearkin paikan mukaan.



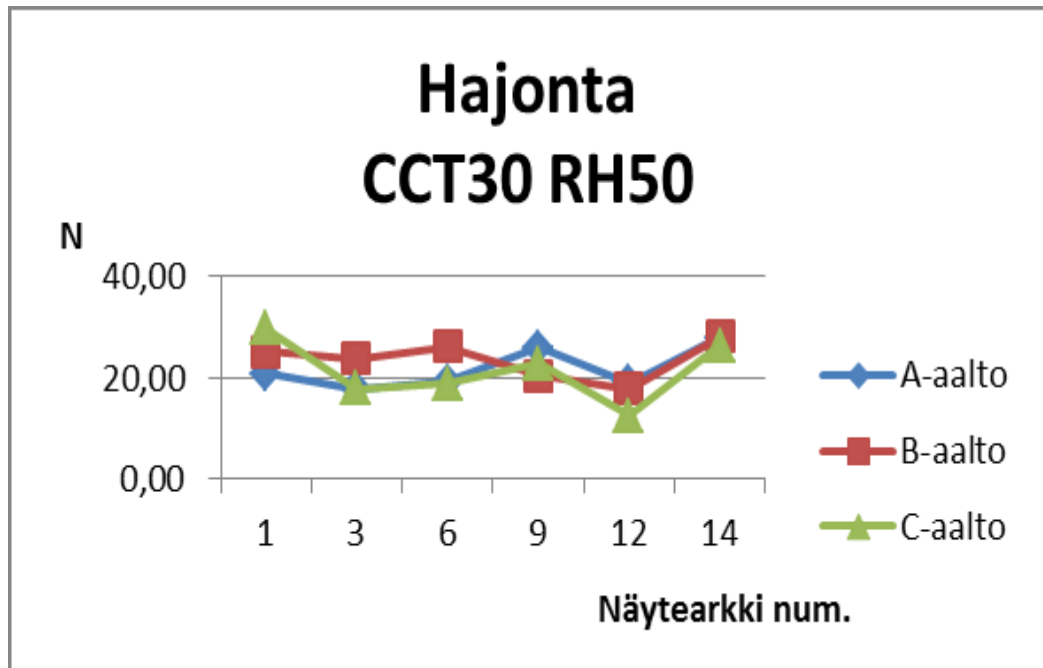
Kuva 14. CMT30-mittausten hajonnat näytearkin paikan mukaan



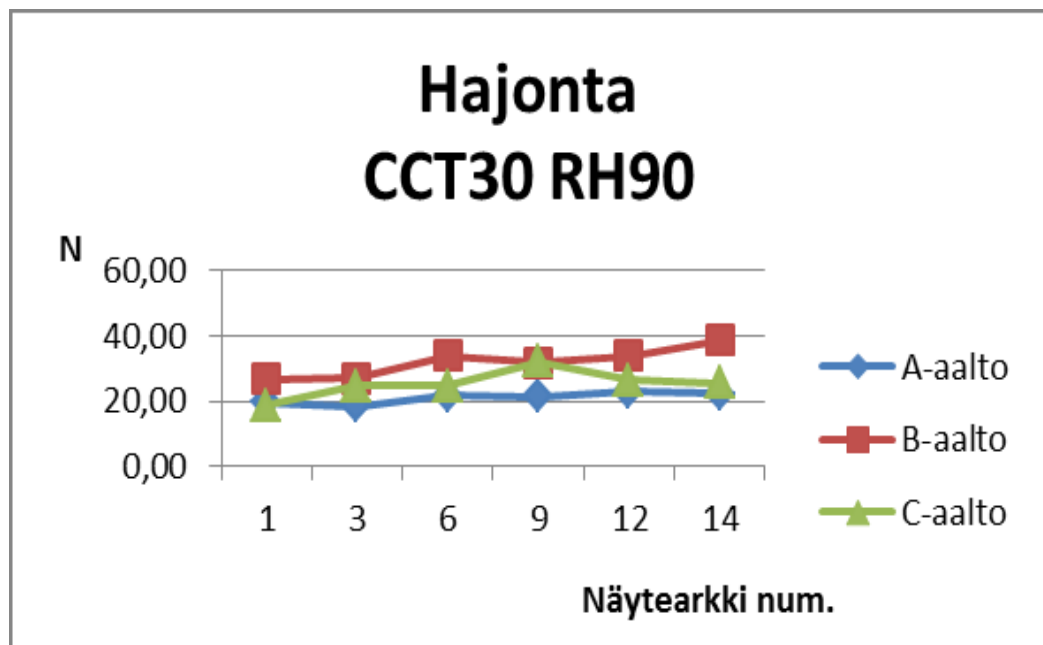
Kuva 15. CMT30-mittausten hajonnat näytearkin paikan mukaan RH90:ssä.



Kuva 16. CCT15-mittausten hajonnat näytearkin paikan mukaan.

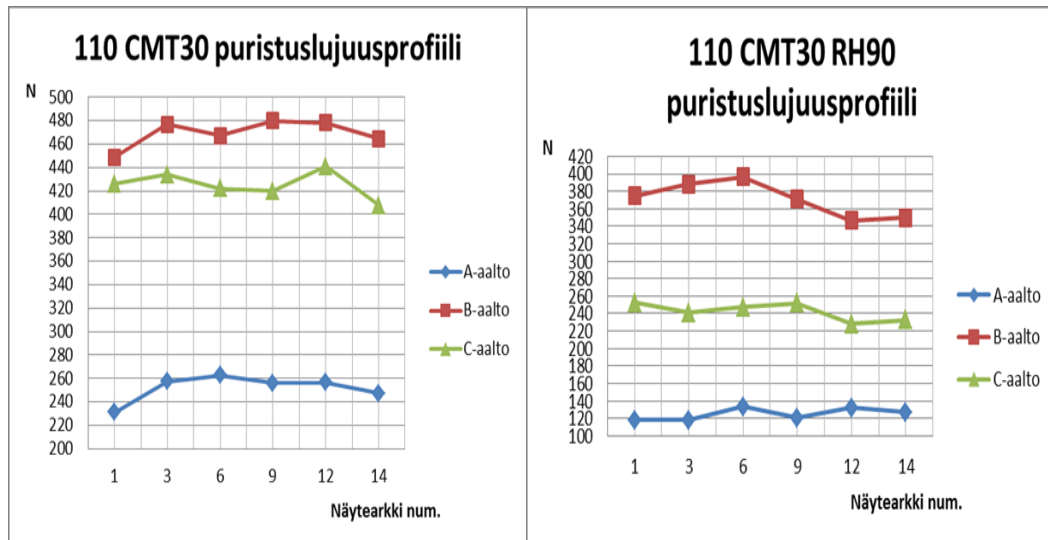


Kuva 17. CCT30-mittausten hajonnat näytearkin paikan mukaan.

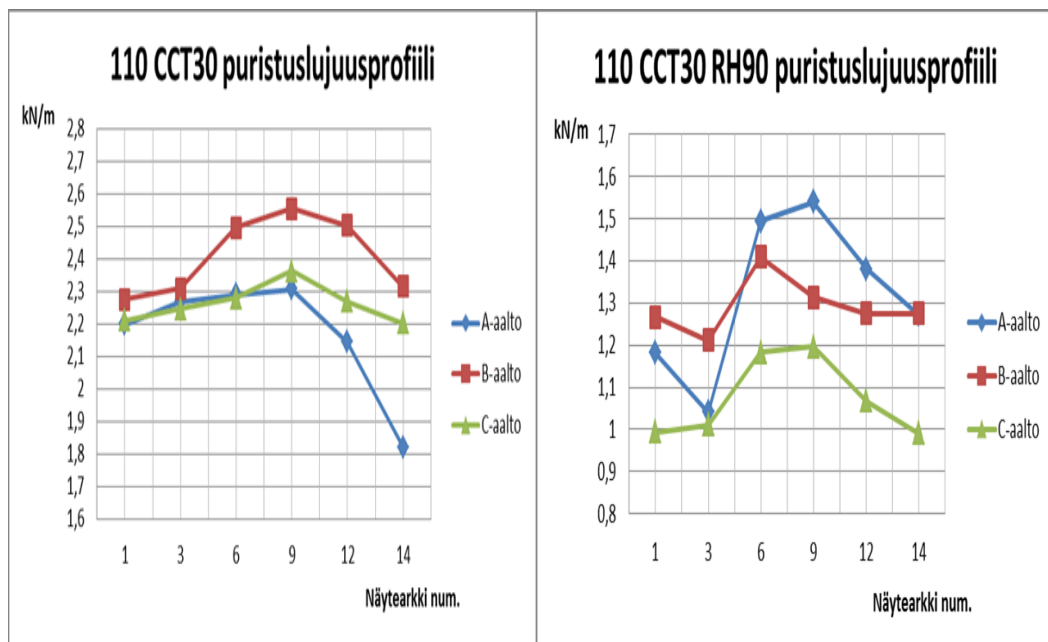


Kuva 18. CCT30-mittausten hajonnat näytearkin paikan mukaan RH90:ssä.

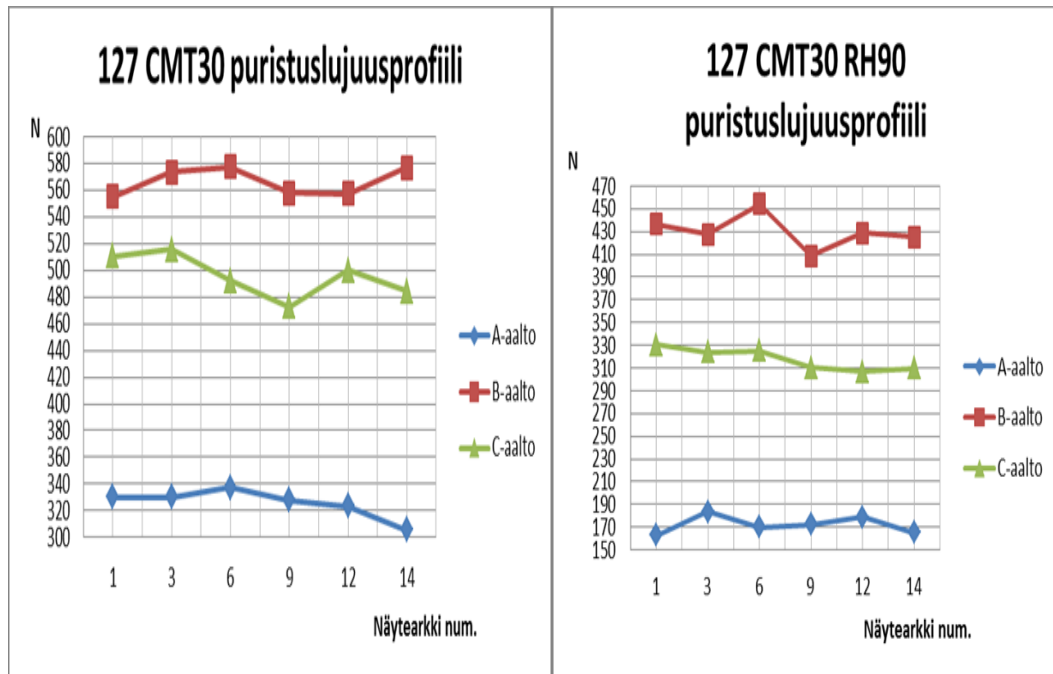
CMT- ja CCT-mittausten puristuslujuusprofiilit kartonkikoneen radalla



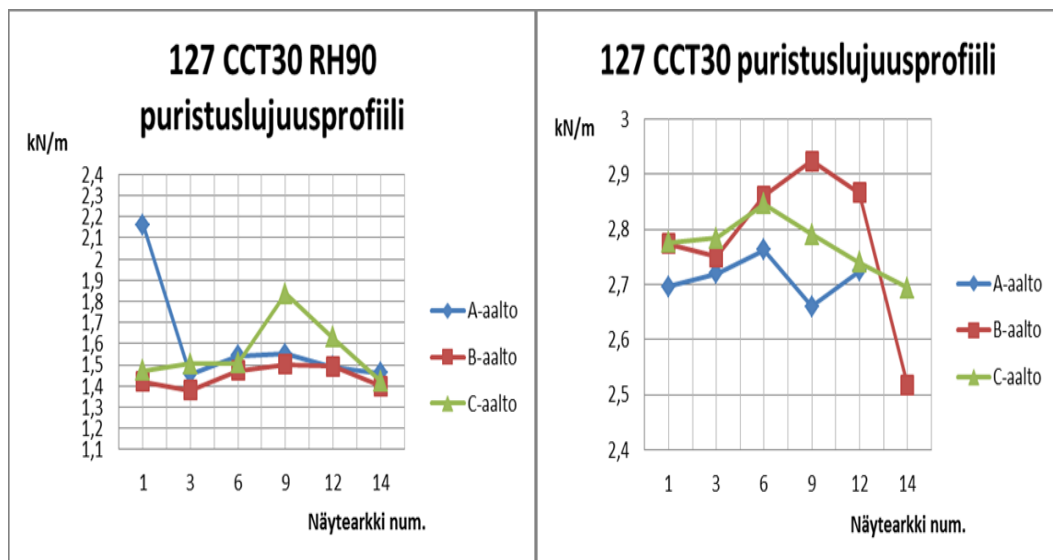
Kuva 19. CMT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 110 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



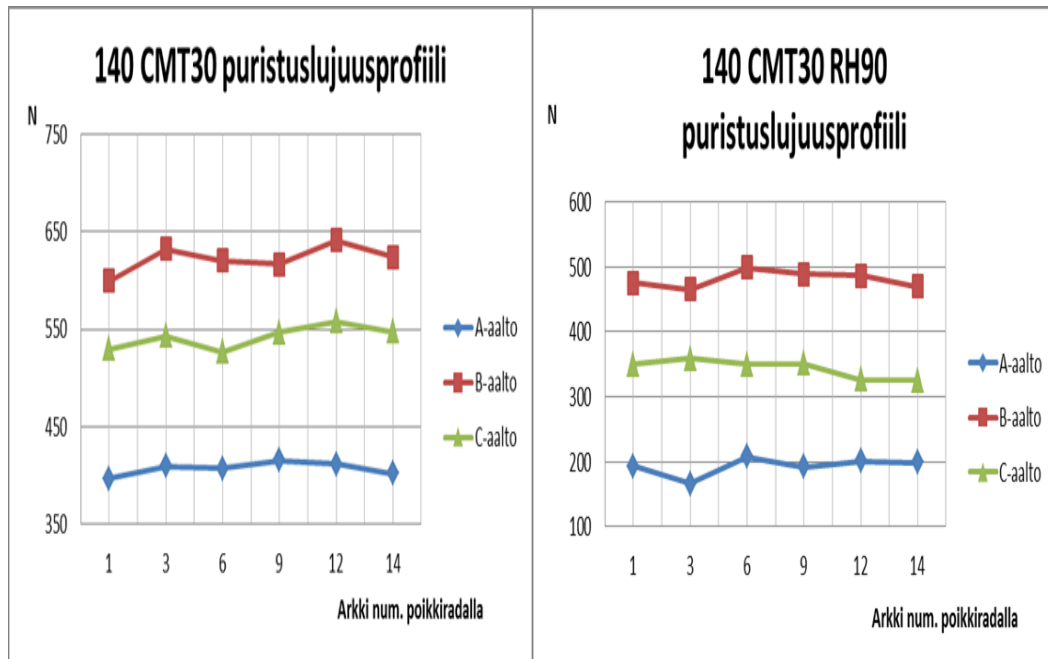
Kuva 20. CCT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 110 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä



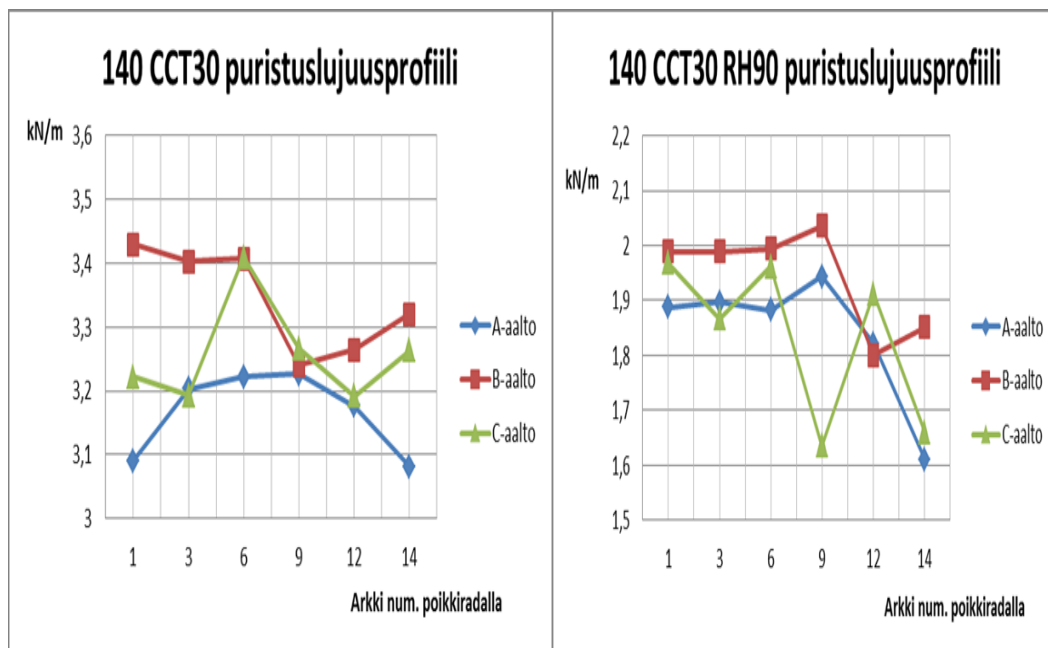
Kuva 21. CMT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 127 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



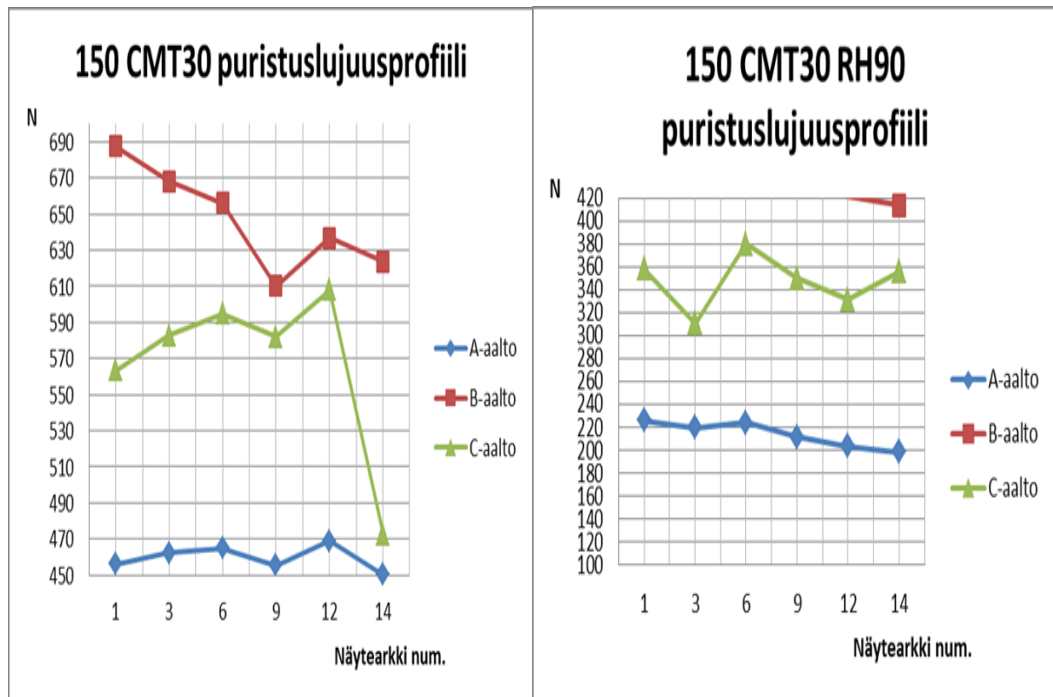
Kuva 22. CCT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 127 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



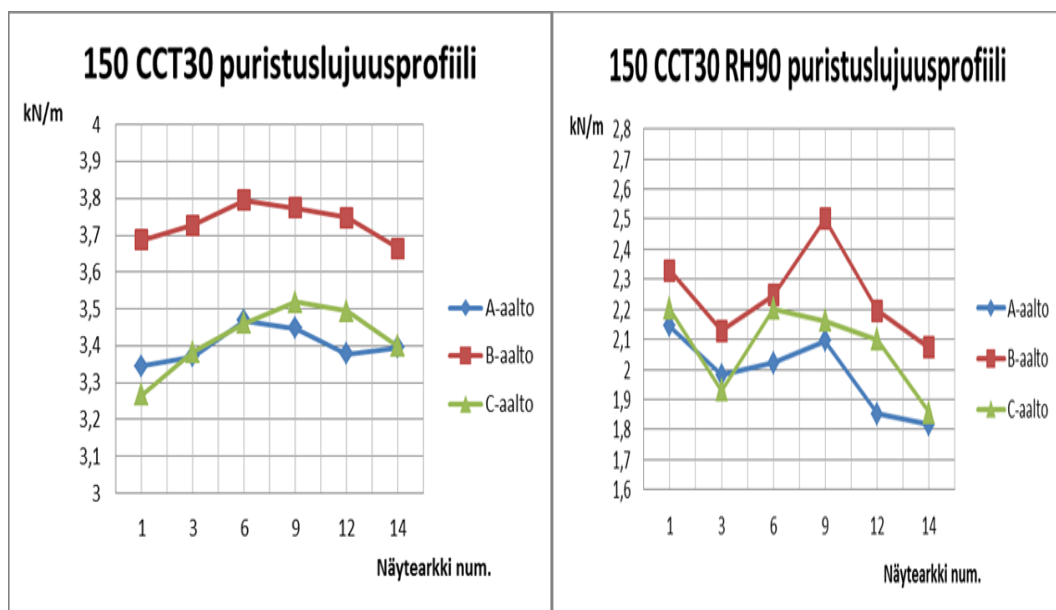
Kuva 23. CMT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 140 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



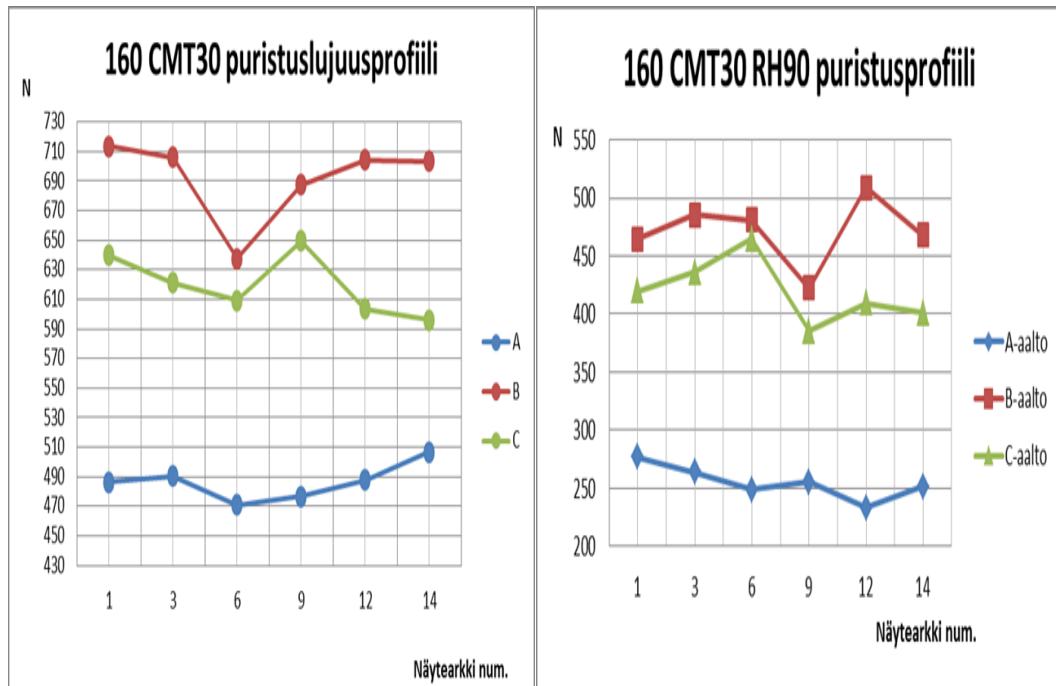
Kuva 24. CCT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 140 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



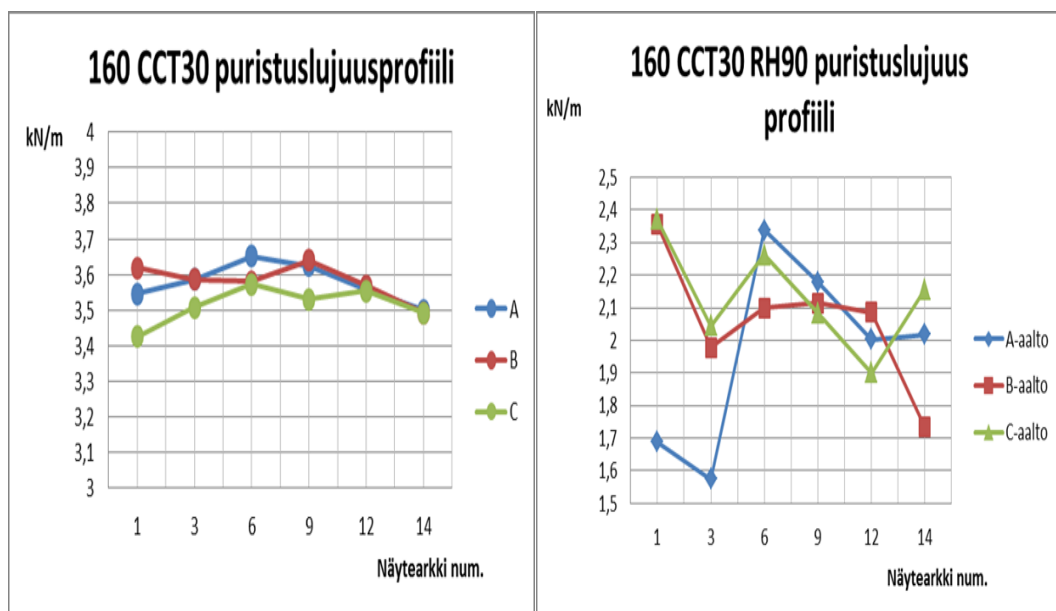
Kuva 25. CMT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 150 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



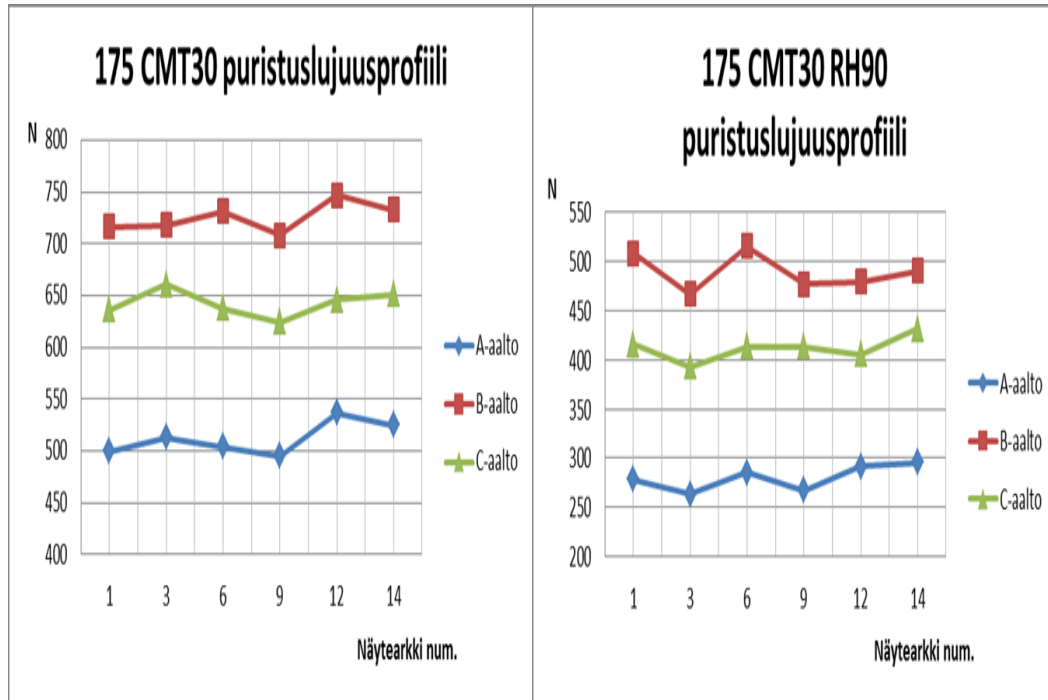
Kuva 26. CCT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 150 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



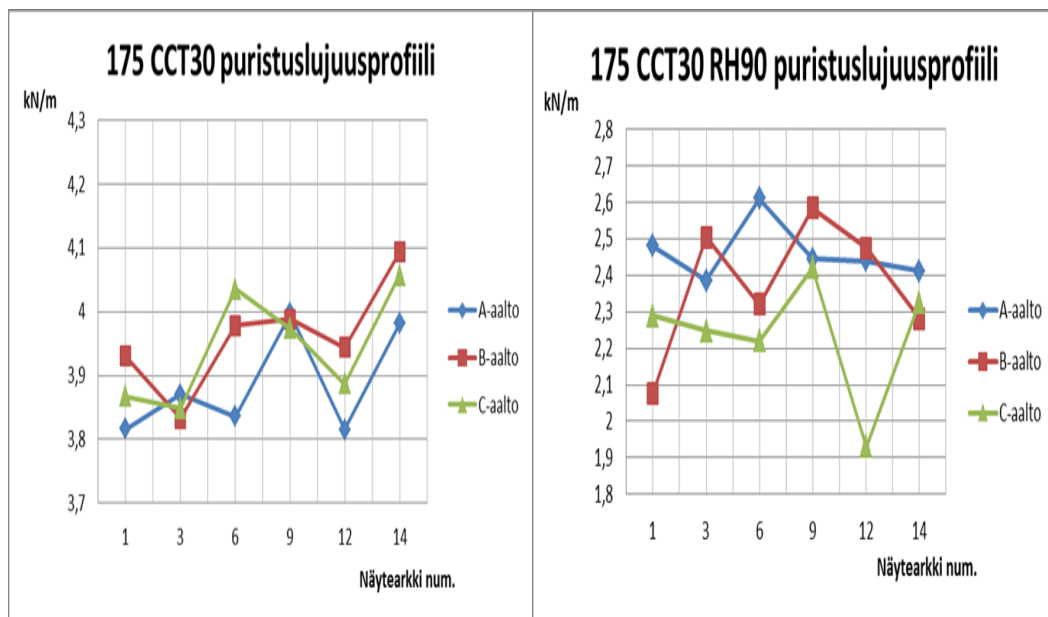
Kuva 27. CMT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 160 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



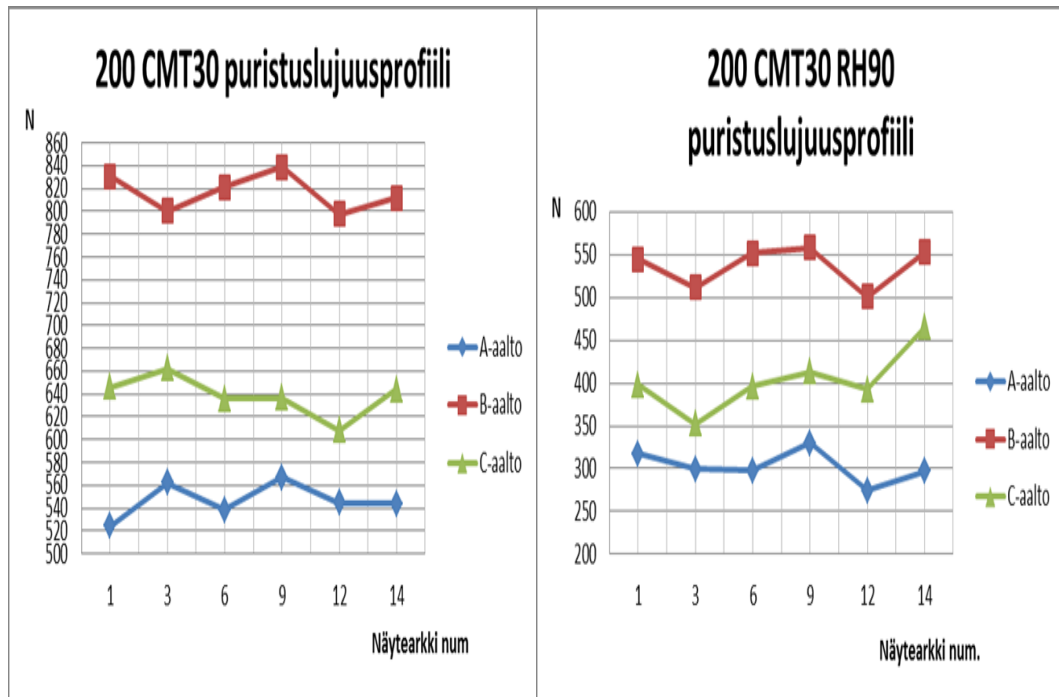
Kuva 28. CCT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 160 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



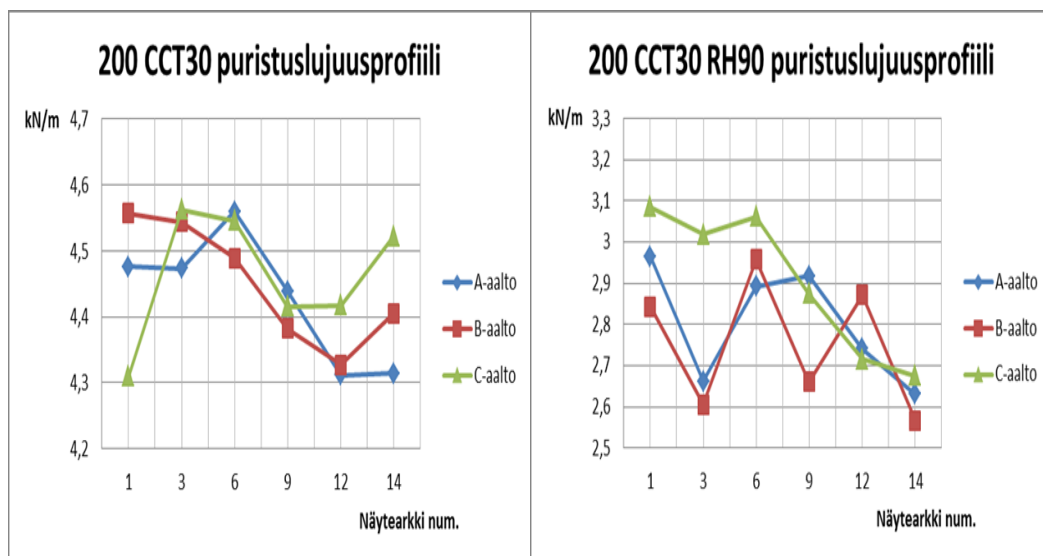
Kuva 29. CMT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 175 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.



Kuva 30. CCT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 175 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.

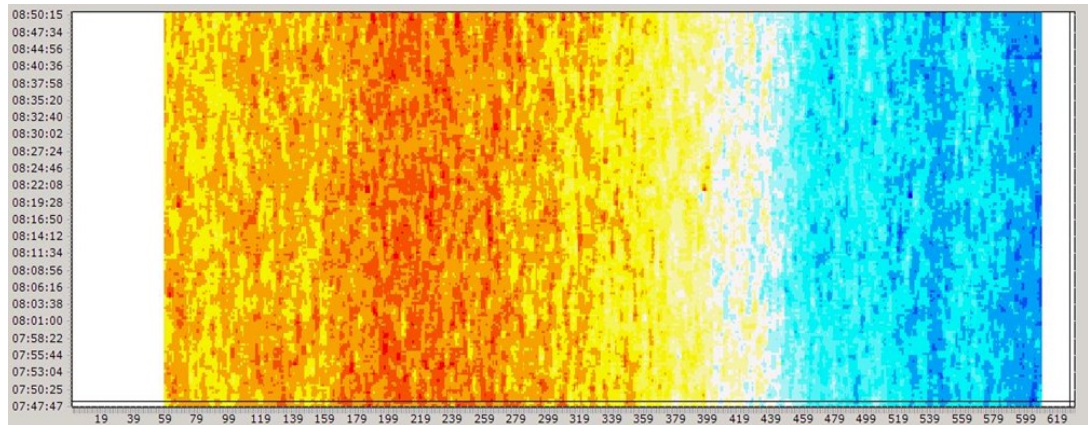


Kuva 31. CMT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 200 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.

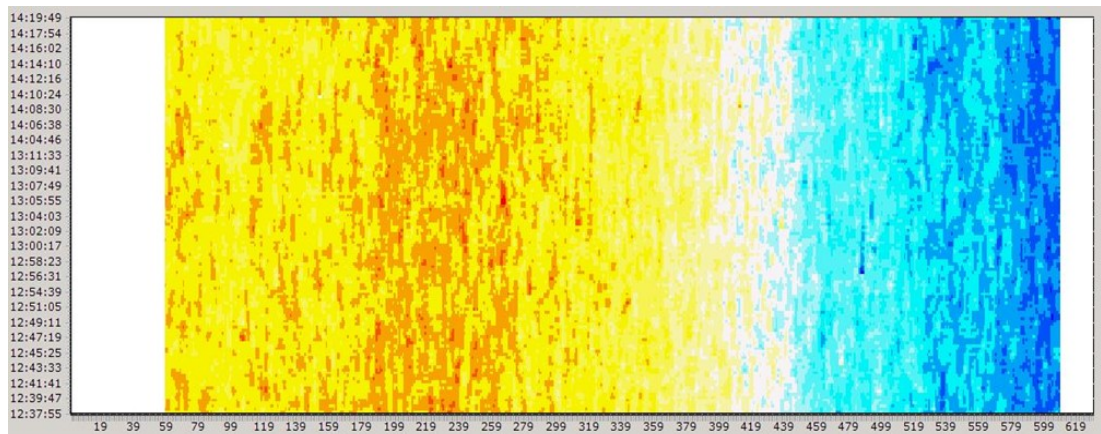


Kuva 32. CCT30 –mittauksen tulokset eri kohdissa kartonkikoneen rataa 200 g/m² neliömassalla RH50:ssä ja RH90:ssä.

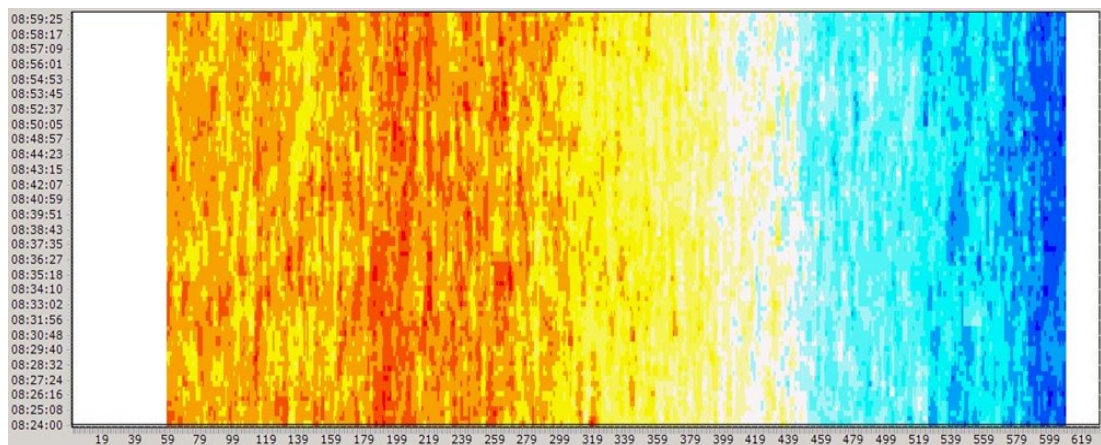
Kartonkikoneen kuituorientaatio näytteenotto hetkinä



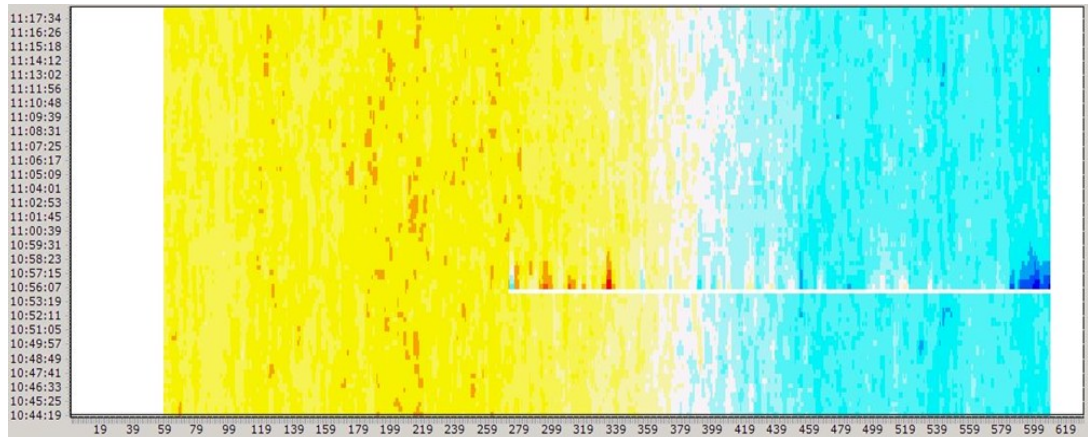
Kuva 33. 110 g/m² näytteen kuituorientaatio näytteenotto hetkenä.



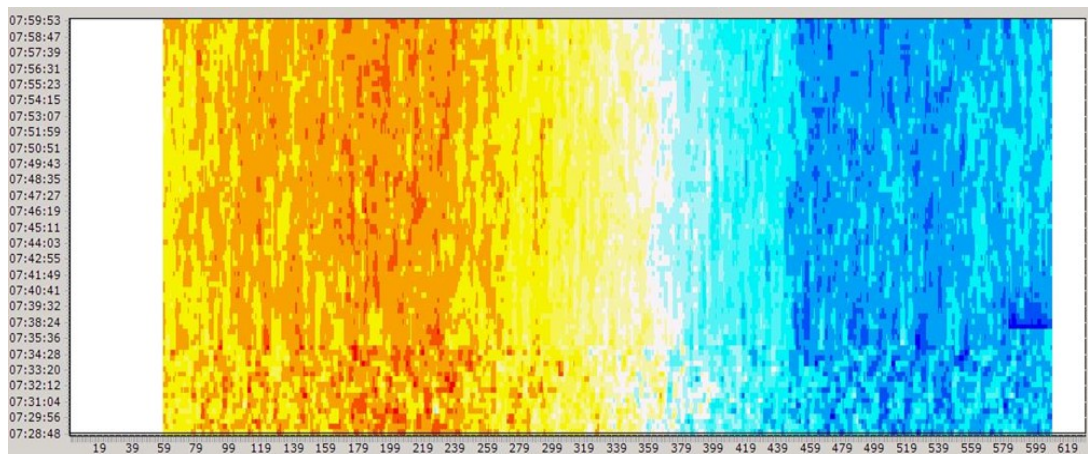
Kuva 34. 127 g/m² näytteen kuituorientaatio näytteenotto hetkenä.



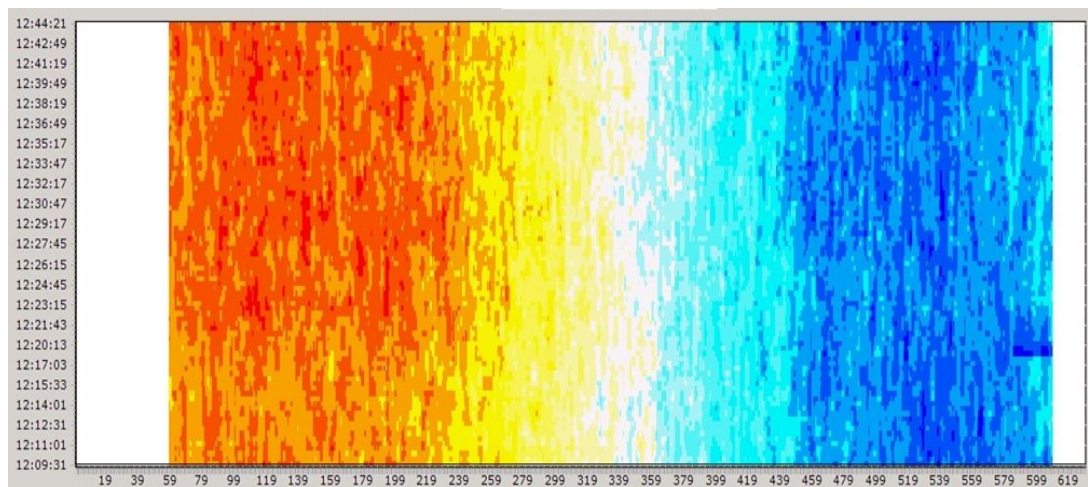
Kuva 35. 140 g/m² näytteen kuituorientaatio näytteenotto hetkenä.



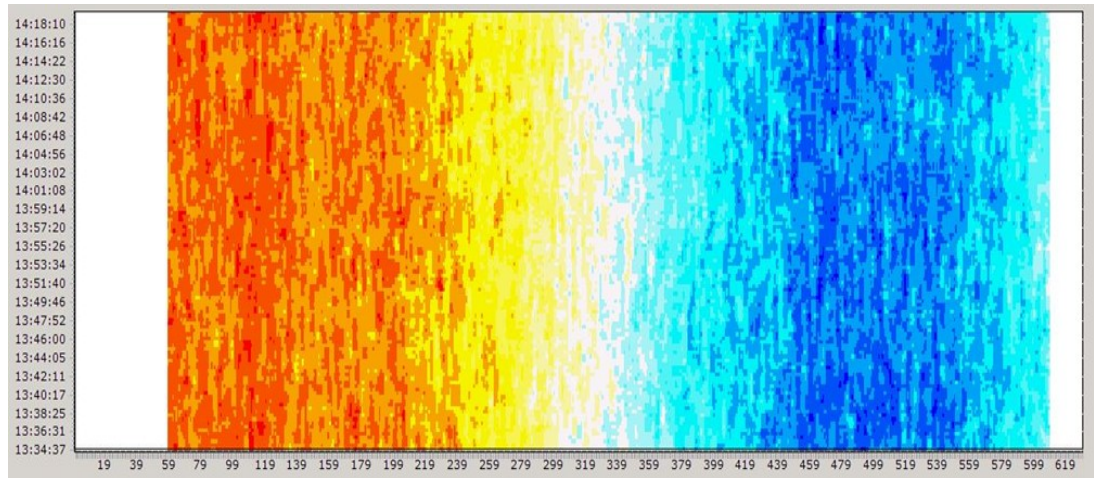
Kuva 36. 150 g/m² näytteen kuituorientaatio näytteenotto hetkenä.



Kuva 37. 160 g/m² näytteen kuituorientaatio näytteenotto hetkenä.

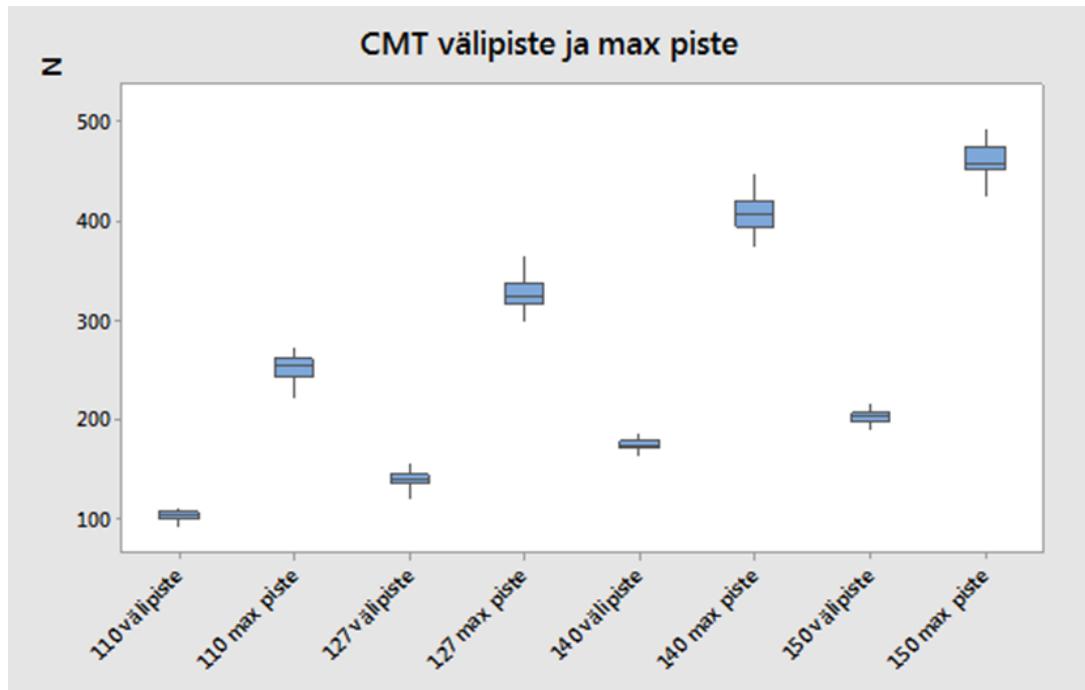


Kuva 38. 175 g/m² näytteen kuituorientaatio näytteenotto hetkenä.



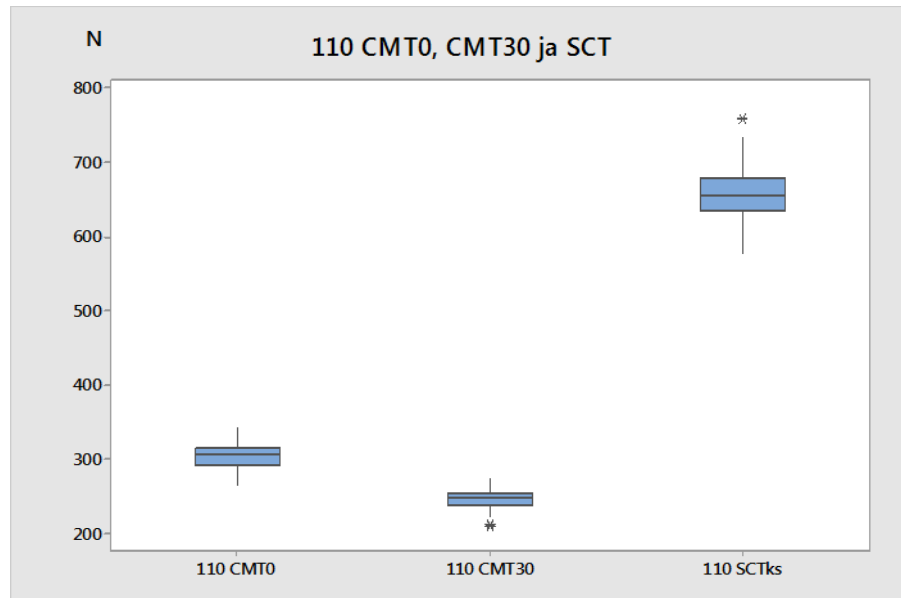
Kuva 39. 200 g/m² näytteen kuituorientaatio näytteenotto hetkenä.

CMT:n välipiste ja maksimipiste

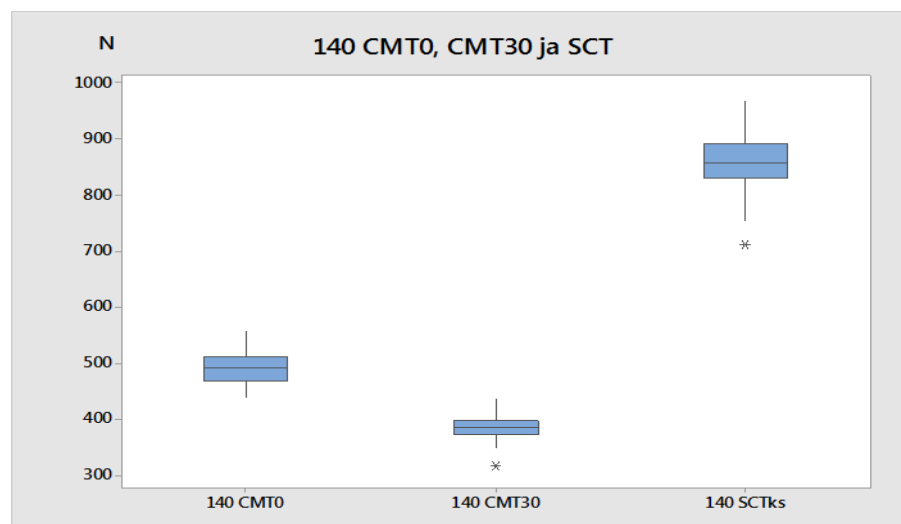


Kuva 40. Boxplot-kuvaaja CMT-välipisteestä ja CMT:n maksimipisteestä eri neliömassoilla.

CMT0-, CMT30- ja SCT-mittauksien laboratorion mittaamat keskiarvot

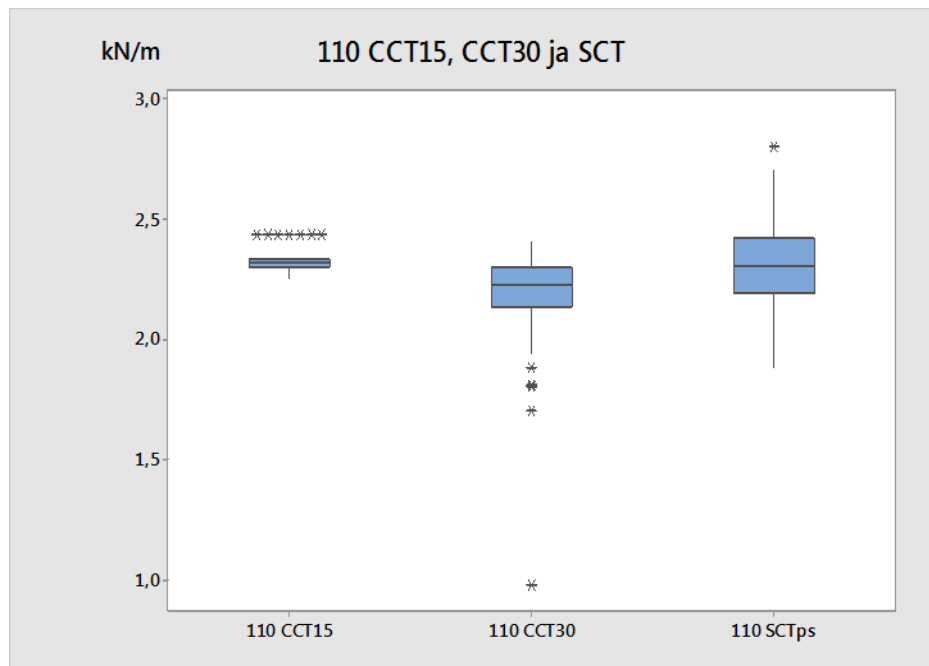


Kuva 41. 110 g/m² CMT0-, CMT30- ja SCT-mittausten arvot boxplot-kuvaajassa.

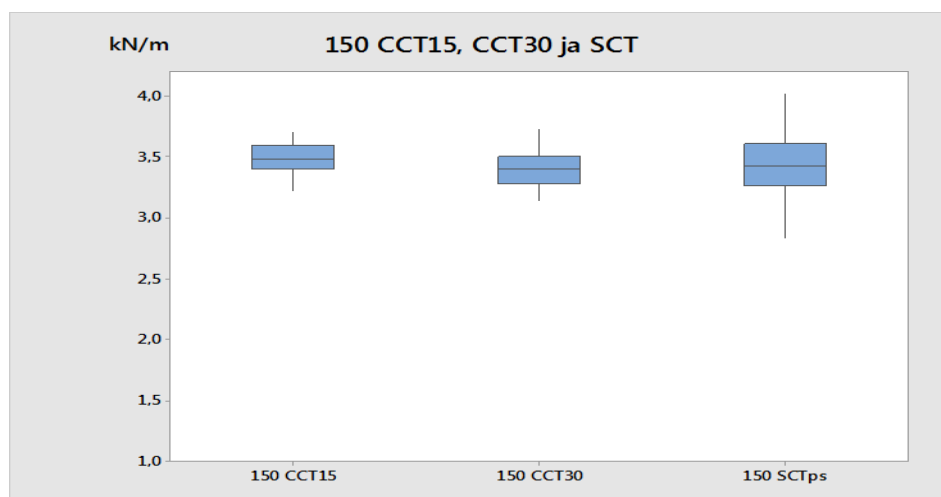


Kuva 42. 140 g/m² CMT0-, CMT30- ja SCT-mittausten arvot boxplot-kuvaajassa.

CCT15-, CCT30- ja SCT-mittauksien laboratorion mittaamat keskiarvot

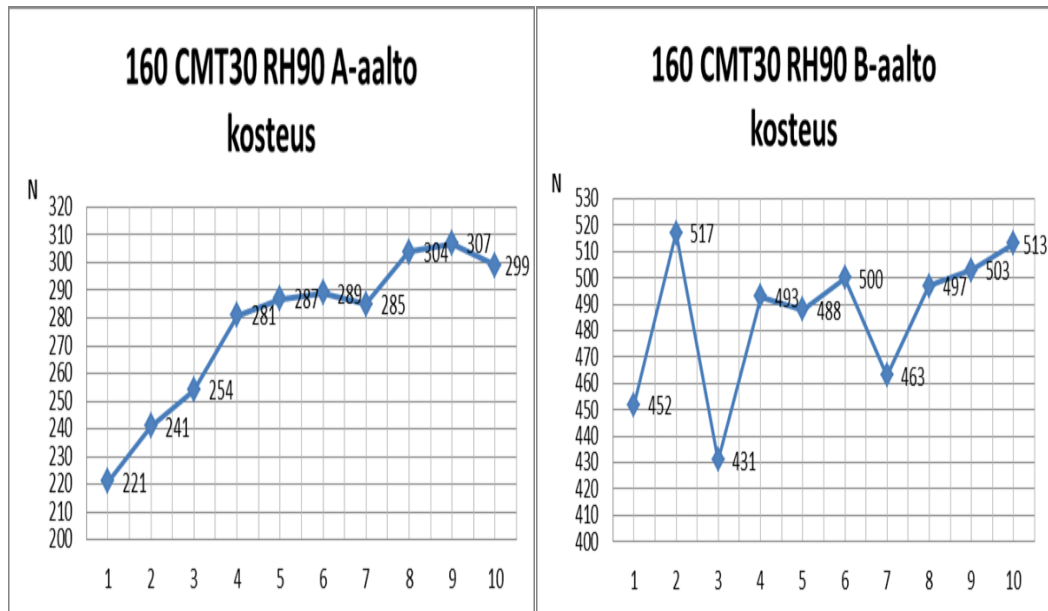


Kuva 43. 110 g/m² CCT15-, CCT30- ja SCT-mittausten arvot boxplot-kuvaajassa.

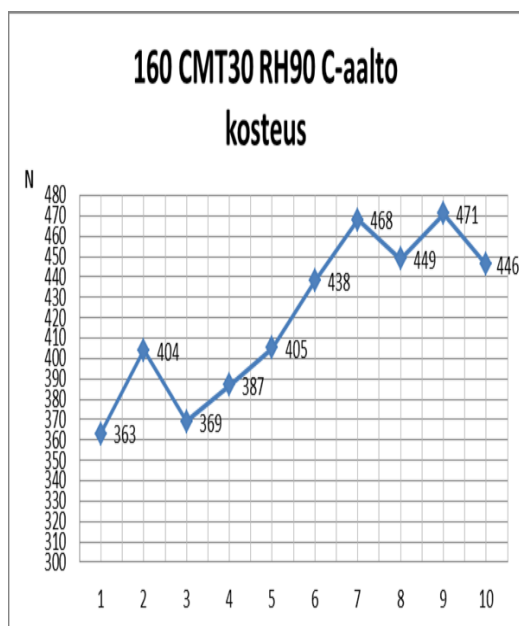


Kuva 44. 150 g/m² CCT15-, CCT30- ja SCT-mittausten arvot boxplot-kuvaajassa.

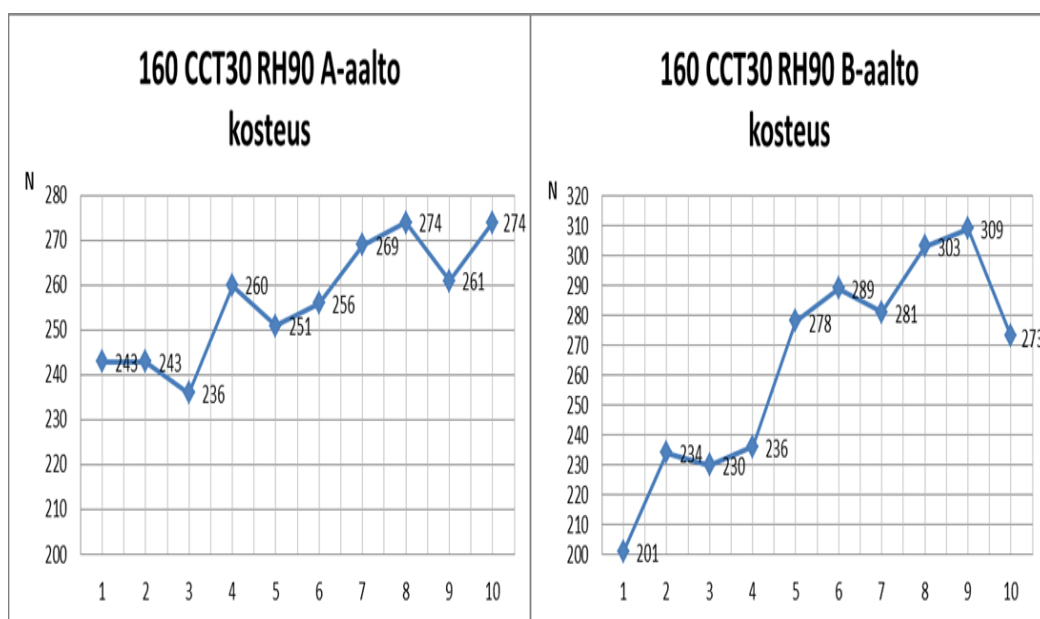
CMT30- ja CCT30-mittausten arvot RH90:ssä



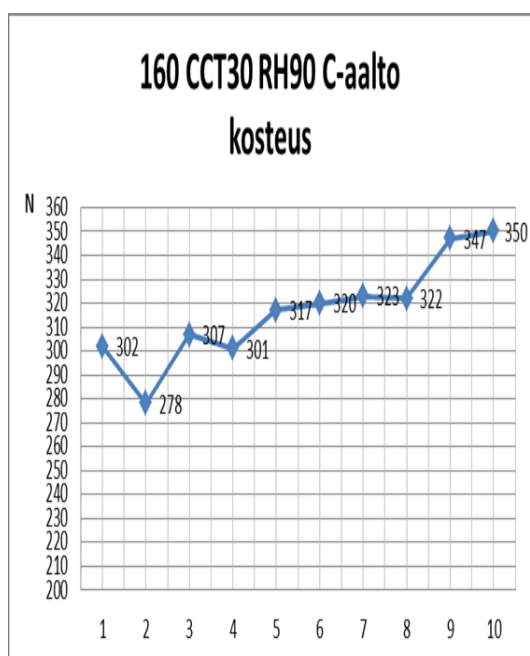
Kuva 45. RH90:ssä CMT30-mittauksen 10 rinnakkaismäärittystä samasta koepisteestä A- ja B-aallolla



Kuva 46. RH90:ssä CMT30-mittauksen 10 rinnakkaismäärittystä samasta koepisteestä C-aallolla



Kuva 47. RH90:ssä CCT30-mittauksen 10 rinnakkaismääritystä samasta koepisteestä A- ja B-aallolla



Kuva 48. RH90:ssä CCT30-mittauksen 10 rinnakkaismääritystä samasta koepisteestä C-aallolla

Matalan neliömassan koeajo

Matalan neliömassan alettua ajetaan koeajo iidan diplomityöhön. Tarkoituksena on saada mahdollisimman selvästi esiin matalalla neliömassalla puristuslujuus erot CCT:ssä ja CMT:ssä B ja C aaltoprofiileilla aallotettaessa.

	CLC:n määrä	jauhatus
testirulla 1	2 %	normaali
testirulla 2 ajo 402048 (poikkirata näytteet + koeajo rulla)	2 %	normaali
testirulla 3	10 %	-10 kW/h
testirulla 4 ajo 402049 (poikkirata näytteet + koeajo rulla)	10 %	-10 KW/h

1. konerulla (ajo 402048) koeajosta ajetaan 2% CLC määrällä ja normaali jauhatuksella.

2. konerulla jatketaan samalla tavalla, mutta siitä otetaan

- 6 poikkiratanäytettä laboratorioon
- konerullan 1. muutosta 2640 mm leveä rulla merkataan koeajo rullaksi (koepiste 1.)

Välissä ajetaan ajo-ohjelman mukaan.

3. konerulla (ajo 402049) CLC:n määrä 10% ja jauhatuksesta pois -10 kW/h

4. konerulla samalla tavoin kuin 3, mutta siitä otetaan

- 6 poikkiratanäytettä laboratorioon
- konerullan 1. muutosta 2640 mm leveä rulla merkataan koeajorullaksi (koepiste 2.)

Koeajo rulliin merkataan leikkurilla ”iidan koeajo rulla”. Varaston kuljettimella rullien päälle merkintä uudestaan ”iidan koeajo rulla”.

Koeajorullat on suunniteltu ajo-ohjelmaan Tommolän Packakingille meneviksi flow-rulliksi. Koeajoa jatketaan aaltopahvitehtaassa.

Matalan neliömassan koeajon tulokset aallotuskartonkitchaalla

Taulukko 2. CMT30- ja CCT30-mittausten tulokset koepisteillä 1 ja 2

CMT						
	RH 50			RH 90		
	A	B	C	A	B	C
Koepiste1	250,6	483,7	408,3	115,7	352,4	238,3
Koepiste 2	256,2	475,9	409,4	124,6	335,5	218,2
CCT						
	RH 50			RH 90		
	A	B	C	A	B	C
Koepiste 1	2,2	2,4	2,2	1,2	1,2	0,9
Koepiste 2	2,3	2,2	2,1	1,1	1,0	0,9

Taulukko 3. CMT30- ja CCT30-mittausten hajonnat koepisteillä 1 ja 2

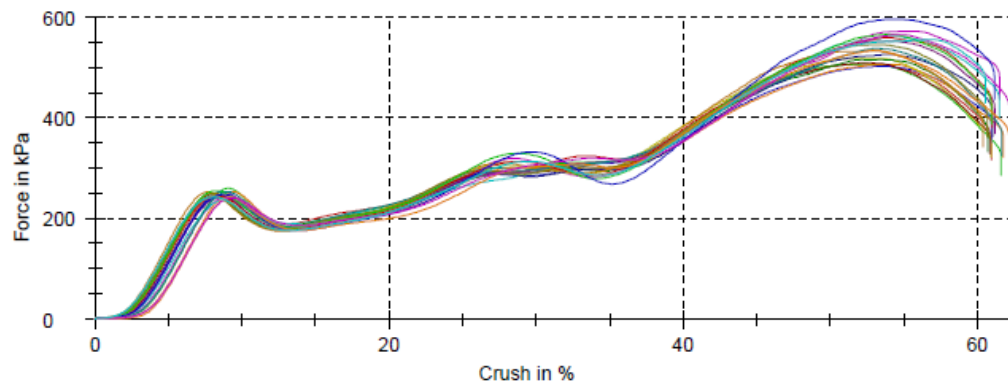
	CMT30 hajonta					
	RH 50			RH 90		
	A	B	C	A	B	C
2 %	2,96	13,78	6,34	2,89	29,90	5,45
10 %	11,65	11,23	11,33	3,28	30,12	7,38
	CCT30 hajonta					
	RH 50			RH 90		
	A	B	C	A	B	C
2 %	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
10 %	0,07	0,03	0,04	0,07	0,04	0,02

Matalan neliömassan koeajon tulokset aaltopahvitehtaalla

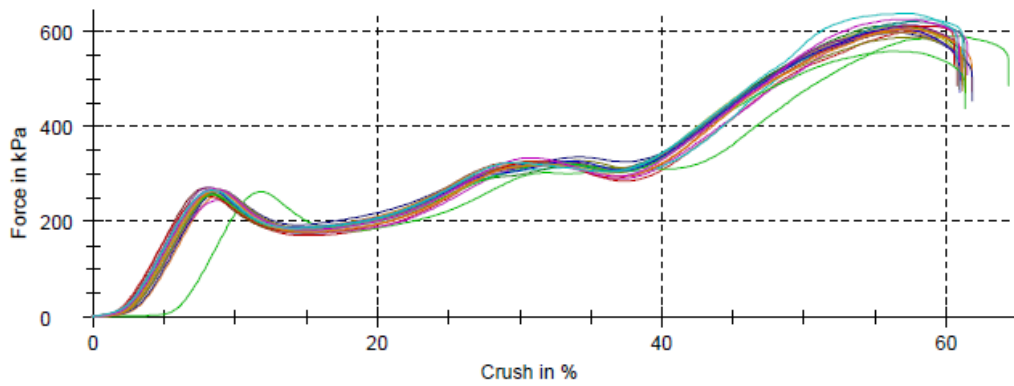
Taulukko 4. FCT- ja ECT-mittausten tulokset ja hajonnat koepisteissä 1 ja 2.

FCT				
	RH50		RH80	
	B	C	B	C
Koepiste 1	607,40	395,70	311,10	200,30
hajonta	16,67	13,54	11,03	9,70
Koepiste 2	538,85	381,35	265,65	189,85
hajonta	27,01	15,28	14,59	7,62
ECT				
	RH50		RH80	
	B	C	B	C
Koepiste 1	5,34	5,97	2,78	2,97
hajonta	0,19	0,16	0,09	0,16
Koepiste 2	5,24	5,81	2,57	2,89
hajonta	0,21	0,18	0,10	0,11

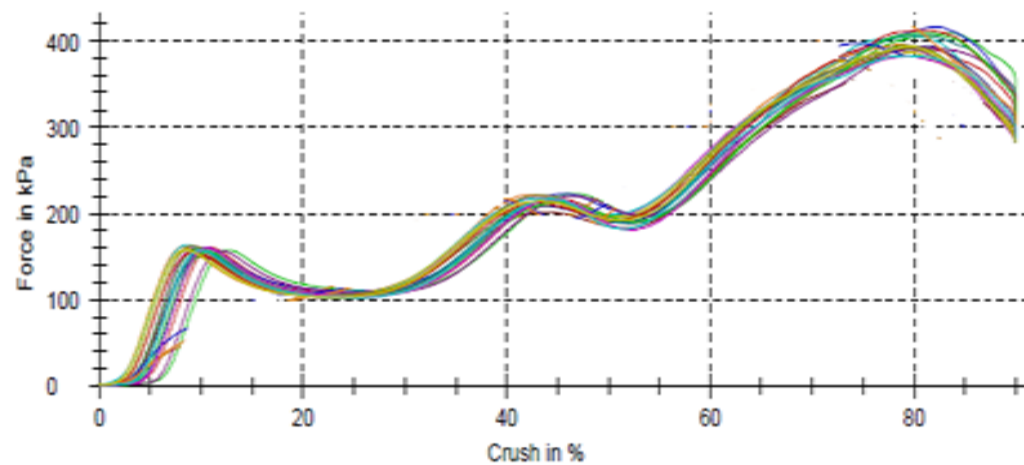
FCT-puristuslujuuskuvaajat



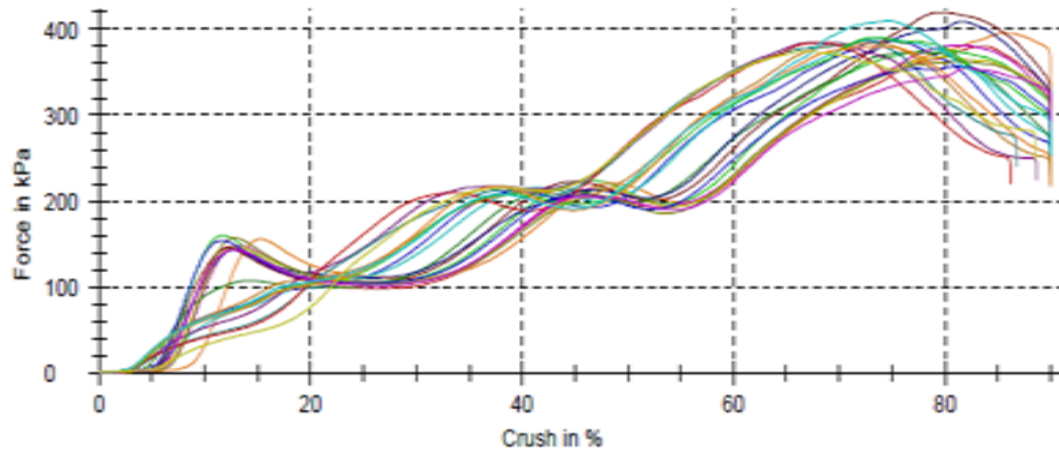
Kuva 49. FCT-puristuslujuuskäyrä koepisteessä 1. B-aallolla



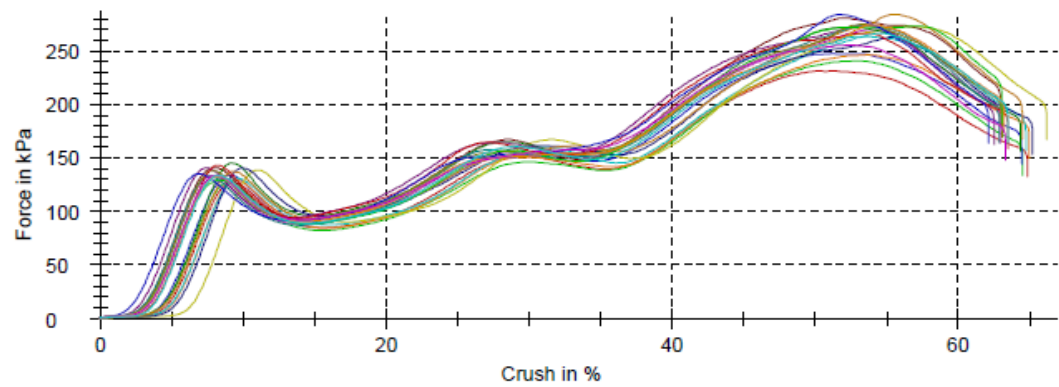
Kuva 50. FCT-puristuslujuuskäyrä koepisteessä 2. B-aallolla



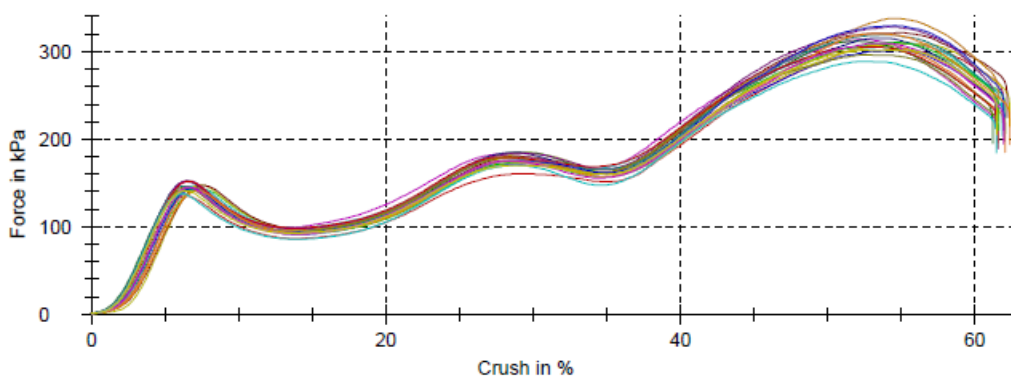
Kuva 51. FCT-puristuslujuuskäyrä koepisteessä 1. C-aallolla



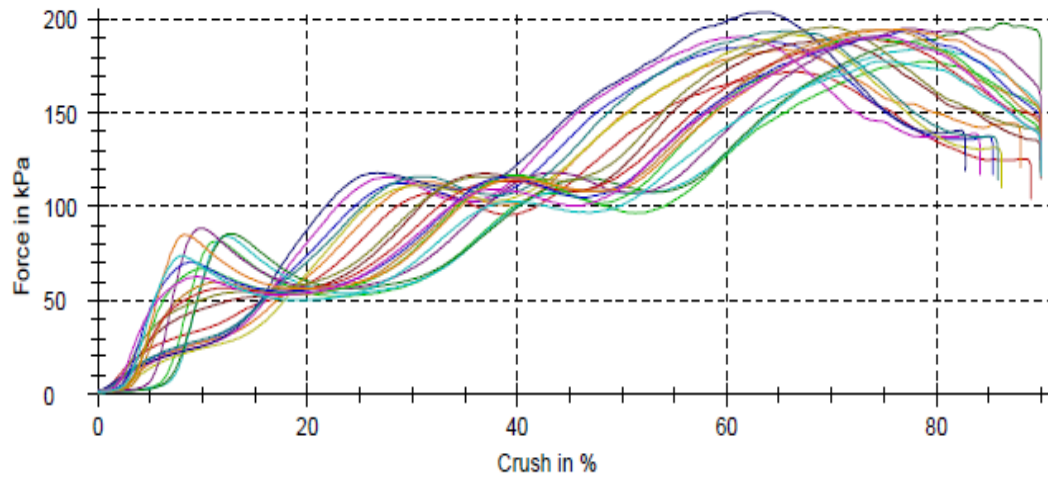
Kuva 52. FCT-puristuslujuuskäyrä koepisteessä 2. C-aallolla.



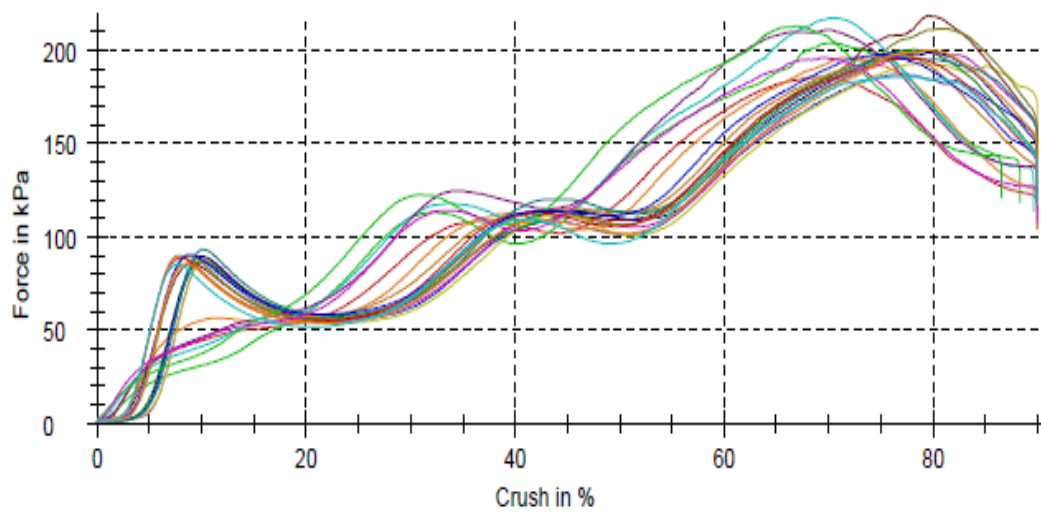
Kuva 53. FCT-puristuslujuuskäyrä koepisteessä 1. B-aallolla, RH80:ssä



Kuva 54. FCT-puristuslujuuskäyrä koepisteessä 2. B-aallolla, RH80:ssä



Kuva 55. FCT-puristuslujuuskäyrä koepisteessä 1. C-aallolla, RH80:ssä



Kuva 56. FCT-puristuslujuuskäyrä koepisteessä 2. C-aallolla, RH80:ssä